



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES**

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MANTO NIVAL EN CAMPO DE HIELO NORTE EN BASE A MEDICIONES GPR TERRESTRE

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
GEOESTUDIOS LTDA.**

S.I.T. N° 359

SANTIAGO, DICIEMBRE, 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ing. Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe Unidad Glaciología y Nieves
Dr. Gonzalo Barcaza Sepúlveda

Inspector Fiscal
Ing. Electrónico Sr. Jorge Huenante Gutiérrez

GEOESTUDIOS LTDA.

Jefes de Proyecto
Dr. Gino Casassa Rogazinski
Dr. Cedomir Marangunic Damianovic

Profesionales

Geomensor Sr. Cristián Peralta Abasolo
Ing. Civil Hidráulica M.Sc. Srta. Gabriela Collao Barrios
Geólogo Sr. José Becerra Rivera
Ing. Informático Sra. Ana María Marangunic Vrsalovic
Ing. Forestal Sr. Jose Luis Rodríguez Lagos
Geógrafo Sr. Martín Bustamante Domic
Ing. Civil Hidráulico Sr. Ashley Apey Freire
Ing. (Ej.) Prevención de Riesgos Sra. Claudia Schönffeldt Palma
Ing. Mecánico Industrial Sr. Marcelo Arévalo González
Técnico Sr. Andrés Marangunic Vrsalovic
Técnico Nivomensor Sr. Alberto Peralta Ramírez
Técnico Nivomensor M.Sc. Sr. Rodrigo Vivanco Figueroa
Técnico Sr. Rodrigo Traub Ramos

I. ÍNDICE

	Página
I. ÍNDICE	i
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Contrato	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Contenido del presente informe	6
2. ÁREA DE ESTUDIO	11
3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	13
4. BALANCE DE ENERGÍA Y METEOROLOGÍA.....	15
4.1. Metodología.....	15
4.2. Resultados meteorológicos	21
4.3. Resultados del balance de energía.....	41
5. TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL EN LA MESETA	47
5.1. Metodología Campañas 2013 y 2014	47
5.2. Resultados	49
5.2.1. Campaña 2013 a la meseta de CHPN.....	49
5.2.2. Campaña 2013 a la meseta de CHPN.....	55
6. RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE.....	57
6.1. Metodología.....	57
6.2. Resultados GPR 2013.....	62
6.3. Resultados GPR 2014.....	92
6.4. Comparación de resultados GPR 2013 y 2014	112
6.5. Determinación del nivel de la napa freática en la meseta central del CHPN.....	116
6.5.1. Metodología.....	117
6.5.2. Resultados	118
6.5.3. Conclusiones	125
7. CARACTERIZACIÓN DEL MANTO NIVAL	127
7.1. Pozos de densidad y temperatura de la nieve	128
7.1.1. Metodología.....	128
7.1.2. Pozos de densidad y temperatura de la nieve en 2013.....	129
7.1.3. Pozos de densidad y temperatura de la nieve en 2014.....	135
7.1.4. Comparación equivalente en agua 2013-2014	141
7.2. Acumulación de nieve mediante torres nivométricas	142
7.2.1. Metodología.....	142

7.2.2.	Resultados	145
7.3.	Densidad superficial de nieve con Monte Rosa	145
7.3.1.	Metodología.....	145
7.3.2.	Resultados	147
7.4.	Extrapolación de la densidad a la meseta	149
8.	ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN EN LA MESETA	153
8.1.	Metodología.....	153
8.2.	Resultados.....	153
9.	MONITOREO FOTOGRÁFICO	159
9.1.	Metodología.....	159
9.2.	Resultados Glaciar San Rafael	159
9.2.1.	1ª Campaña San Rafael (2013).....	159
9.2.2.	2ª Campaña San Rafael (febrero 2014).....	161
9.2.3.	3ª Campaña San Rafael (agosto 2014)	161
9.3.	Glaciar Colonia.....	164
9.3.1.	1ª Campaña Colonia (octubre 2013)	165
9.3.2.	2ª Campaña Colonia (febrero 2014)	165
9.3.3.	3ª Campaña Colonia (septiembre 2014).....	165
10.	MONITOREO DEL NIVEL DE AGUA.....	171
10.1.	Metodología lago proglacial Colonia	171
10.2.	Resultados lago proglacial Colonia	175
10.3.	Metodología laguna San Rafael.....	178
10.4.	Resultados laguna San Rafael	182
11.	MODELACIÓN DE LA ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN	201
11.1.	Metodología.....	201
11.2.	Resultados.....	204
11.2.1.	Torre nivométrica glaciar San Rafael.....	204
11.2.2.	Torre nivométrica glaciar Colonia	206
11.2.3.	Datos de precipitación.....	206
11.2.4.	Calibración del modelo	209
11.2.4.1.	Calculo de la precipitación sobre CHPN.....	209
11.2.4.2.	Balance de masa medido.....	210
11.2.4.3.	Resultados del modelo	210
11.2.4.4.	Extrapolación de los modelos a toda el área	212
12.	CAMBIOS DE ELEVACIÓN MEDIANTE DATOS GPS	219
12.1.	Metodología.....	219
12.2.	Resultados.....	221
12.2.1.	Cambios elevación DGPS periodo 2014-2010	227
12.2.1.1.	Glaciar San Rafael 2014-2010.....	227
12.2.1.2.	Glaciar San Quintín 2014-2010	230
12.2.2.	Cambios elevación DGPS periodo 2014-2011	232
12.2.2.1.	Glaciar Colonia 2014-2011	232
12.2.3.	Cambios de elevación DGPS periodo 2011-2010.....	234
12.2.3.1.	Glaciar San Rafael 2011-2010.....	234
12.2.3.2.	Glaciar San Quintín 2011-2010	236
12.2.4.	Cambios elevación DGPS periodo 2014-2013	238

12.2.4.1. San Rafael 2014-2013	238
12.2.4.2. Glaciar San Quintín 2014-2013	241
12.2.4.3. Glaciar Colonia 2014-2013	244
12.2.5. Resumen cambios de elevación con datos DGPS	247
13. CAMBIOS DE ELEVACIÓN MEDIANTE DATOS LIDAR	249
13.1. Metodología.....	249
13.2. Resultados	252
13.2.1. CAMBIOS DE ELEVACIÓN ENTRE DATOS GPS 2013 Y LIDAR 2012/2013.....	260
14. BIBLIOGRAFÍA	265
ANEXO 1. 1ª CAMPAÑA (2013) a la MESETA CHPN.....	269
ANEXO 1.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 1ª CAMPAÑA (2013) a la MESETA CHPN	269
ANEXO 1.2. FOTOS DE LA 1ª CAMPAÑA (2013)	278
ANEXO 2. 2ª CAMPAÑA (2013) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA.....	289
ANEXO 2.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 2ª CAMPAÑA (2013) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA	289
ANEXO 2.2. FOTOS DE LA 2ª CAMPAÑA (2013)	290
ANEXO 3. 3ª CAMPAÑA (2014) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL	291
ANEXO 3.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 3ª CAMPAÑA (2014) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL	291
ANEXO 3.2. FOTOS DE LA 3ª CAMPAÑA (2014) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL	293
ANEXO 4. 4ª CAMPAÑA (2014) A LA MESETA DEL CHPN	297
ANEXO 4.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 4ª CAMPAÑA (2014) A LA MESETA DEL CHPN	297
ANEXO 5. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS	315
ANEXO 5.1 CAMPAÑA N°1 MESETA CHPN (2013).....	315
ANEXO 5.2 CAMPAÑA N°2 LAGO PROGLACIAL COLONIA (2013)	316
ANEXO 5.3 CAMPAÑA N°3 LAGO PROGLACIAL COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL (2014)	316
ANEXO 5.4 CAMPAÑA N°4 MESETA CHPN (2014).....	316
ANEXO 6. PROGRAMA DEL DATALOGGER DE LAS TORRES NIVOMÉTRICAS	319
ANEXO 7. RESULTADO DEL CÁLCULO DGPS DE LA POSICIÓN DE LA BASE CHPN2 MEDIANTE NOAA OPUS	321
ANEXO 8. RESULTADO DEL CÁLCULO PPP DE LA POSICIÓN DE LA BASE CHPN2 MEDIANTE PPP NRC	323
ANEXO 9. AJUSTE DE LA ECUACIÓN SIGMOIDAL PARA LA INTERPOLACIÓN DE LA NAPA FREÁTICA	337
ANEXO 10. ÍNDICE ANEXOS DIGITALES	341

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-A. Cronograma de actividades.	13
Tabla 4.2-A. Datos de temperatura a 2 m utilizados.	21
Tabla 4.2-B. Datos de humedad relativa a 2 m utilizados.	22
Tabla 4.2-C. Datos de viento a 2 m utilizados.	22
Tabla 4.2-D. Datos de altura de nieve.	25
Tabla 4.2-E. Datos de radiación de onda corta.	26
Tabla 4.2-F. Datos disponibles de radiación de onda larga.	30
Tabla 4.2-G. (a) Temperatura del aire media mensual en °C. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.	36
Tabla 4.2-H. (a) Temperatura del aire media mensual en °C. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.	36
Tabla 4.2-I. (a) Humedad relativa media mensual en %. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.	37
Tabla 4.2-J. (a) Humedad relativa media mensual en %. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.	37
Tabla 4.2-K. (a) Velocidad del viento media mensual en m/s. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.	38
Tabla 4.2-L. (a) Velocidad del viento media mensual en m/s. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.	38
Tabla 4.2-M. (a) Radiación de onda corta neta media mensual en W/m ² . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.	39
Tabla 4.2-N. (a) Radiación de onda corta neta media mensual en W/m ² . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.	39
Tabla 4.2-O. (a) Radiación de onda larga neta media mensual en W/m ² . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.	40
Tabla 4.2-P. (a) Radiación de onda larga neta media mensual en W/m ² . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.	40
Tabla 4.3-A. Flujos promedio mensuales de energía.	43
Tabla 4.3-B. Sublimación, fusión y ablación estimada.	45
Tabla 5.2.1-A. Coordenadas del punto de referencia CHPN2.	50
Tabla 5.2.1-B. Coordenadas 2013 de las balizas calculadas mediante GPS diferencial utilizando la base CHPN2.	53
Tabla 5.2.2-A. Coordenadas 2014 de las balizas calculadas mediante GPS diferencial utilizando la base CHPN2.	56
Tabla 6.1-A. Parámetros programados para mediciones del manto nival en CHPN en la unidad de control SIR-3000.	59
Tabla 6.2-A. Características de los perfiles de radar adquiridos en la campaña de agosto de 2013.	64

Tabla 6.3-A. Características de los perfiles de radar adquiridos en la campaña de agosto de 2014.	93
Tabla 6.4-A. Amplitudes correspondientes al reflector de la napa freática.	114
Tabla 6.5.2-A. Datos disponibles de profundidad de nivel freático en CHPN.	118
Tabla 6.5.3-A. Espesores interpolados de la napa freática para la zona de acumulación de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia.	125
Tabla 7.1.2-A. Densidad, temperatura y granulometría Pozo N.1, glaciar San Rafael, cota 1160 m s.n.m., 2013, que denominamos Pozo San Rafael 2013.	130
Tabla 7.1.2-B. Densidad, temperatura y granulometría Pozo N.2, glaciar Colonia.	131
Tabla 7.1.2-C. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo San Rafael 2013.	134
Tabla 7.1.2-D. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo Colonia 2013.	135
Tabla 7.1.3-A. Densidad, temperatura y granulometría Pozo San Rafael 2014, cota 1152 m s.n.m. UTM 18G. Grano redondeado a menos que se especifique lo contrario.	136
Tabla 7.1.3-B. Densidad, temperatura y granulometría Pozo Colonia 2014.	137
Tabla 7.1.3-C. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo San Rafael 2014.	140
Tabla 7.1.3-D. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo Colonia 2014.	141
Tabla 7.2.2-A. Cordenadas UTM de la Torre 1 y Torre 2 en 2013 y 2014.	145
Tabla 7.3.2-A. Densidad de la capa superior de 40"	148
Tabla 7.3.2-B. Densidad de la capa superior de 55,4"	148
Tabla 7.3.2-C. Comparación de densidades entre el método Monte Rosa y pozo estratigráfico en 2013.	149
Tabla 8.2-A. Cotas de la ELA en los glaciares de la zona sur, según Rivera <i>et al.</i> (2007).	156
Tabla 9.2.3-A. Registro de mantención y fotos de las cámaras 1 y 2 del glaciar San Rafael.	162
Tabla 9.3.3-A. Registro de mantención y fotos de las cámaras 1 y 2 del glaciar Colonia.	166
Tabla 10.2-A. Promedio, máximos y mínimos mensuales del nivel registrado en el lago proglacial Colonia, año 2014.	177
Tabla 10.4-A. Registros de valores máximos, mínimos y promedio del nivel de agua en la laguna San Rafael.	195
Tabla 10.4-B. Registros de valores máximos, mínimos y promedio del nivel de agua en la nueva estación de nivel de la laguna San Rafael, periodo 5 de abril a 6 de septiembre 2014.	199
Tabla 11.2.4.3-A. Parámetros de calibración de los modelos.	211
Tabla 11.2.4.3-B. Balances totales observados y estimados con los modelos.	211
Tabla 12.1-A. Datos DGPS disponibles para el cálculo de cambios de elevación.	220
Tabla 12.2.5-A. Valores de dh para cada par de épocas y estadísticas respectivas de los cruces.	247
Tabla 13.1-A. Datos LIDAR provistos por la DGA.	251
Tabla 13.1-B. Elevación de la línea de equilibrio (m s.n.m.).	251
Tabla 13.2-A. Resultados de la diferencia de altura (dh) obtenida en la comparación de los DEM LIDAR en el área de estudio.	252

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2-A. Imagen satelital del Campo de Hielo Patagónico Norte con indicación de las transectas a realizar en el estudio.	5
Figura 4.1-A. Ubicación de la estación meteorológica en la meseta del glaciar San Rafael, al costado del refugio EGGSR.	19
Figura 4.1-B. Estación meteorológica Campbell (2 m y 4 m) y Vaisala (4 m) en la meseta de glaciar San Rafael, aledaño a EGGSR. Torre con sensores de temperatura, humedad y viento. Agosto 2013.	20
Figura 4.1-C. Marco con radiómetro y sensor de altura de nieve de la estación meteorológica en la meseta del glaciar San Rafael. Agosto 2013.	20
Figura 4.2-A. Temperatura del aire a 2 m, del 16 de agosto 2012 al 4 de septiembre 2014.	21
Figura 4.2-B. Humedad relativa a 2 m, del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.	22
Figura 4.2-C. Velocidad del viento a 2 m, del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.	24
Figura 4.2-D. Dirección del viento correspondiente al sensor Campbell, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.	24
Figura 4.2-E. Dirección del viento correspondiente al sensor Vaisala, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.	24
Figura 4.2-F. Altura de nieve, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.	25
Figura 4.2-G. Radiación de onda corta neta, del 16 de agosto al 4 de septiembre de 2014.	27
Figura 4.2-H. Radiación de onda corta incidente y reflejada, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.	27
Figura 4.2-I. Radiación de onda corta incidente y reflejada, del 9 de noviembre 2013 al 4 de septiembre 2014.	28
Figura 4.2-J. Albedo promedio diario, del 16 de noviembre de 2012 al 3 de septiembre de 2014.	29
Figura 4.2-K. Los dos refugios (cápsulas) de EGGSR cubiertas en gran medida por nieve en agosto 2013.	29
Figura 4.2-L. Los dos refugios (cápsulas) a la llegada a EGGSR en agosto 2014. Nótese que la cubierta de nieve es menor a la de agosto 2013.	30
Figura 4.2-M. Radiación de onda larga neta, del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.	31
Figura 4.2-N. Radiación de onda larga incidente y emitida, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.	32
Figura 4.2-O. Radiación de onda larga incidente y emitida, del 9 de noviembre 2013 al 4 de septiembre 2014.	33
Figura 4.2-P. Precipitación registrada y rellenada en estación LSR y precipitación estimada en la estación EGGSR.	34
Figura 4.2-Q. Precipitación mensual en EGGSR.	35
Figura 4.2-R. Temperatura del aire media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.	36
Figura 4.2-S. Humedad relativa media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.	37
Figura 4.2-T. Velocidad del viento media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.	38

Figura 4.2-U. Radiación de onda corta neta media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.	39
Figura 4.2-V. Radiación de onda larga neta media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.	40
Figura 4.3-A. Flujos promedio mensuales de energía.	43
Figura 4.3-B. Flujos promedio horarios de energía.	44
Figura 4.3-C. Ablación horaria estimada con el balance de energía y medida en la Torre San Rafael (T1).	46
Figura 5.1-A. Estación base CHPN2, campaña 2013.	48
Figura 5.1-B. Estación base CHPN2, agosto 2014.	49
Figura 5.2.1-A. GPS diferencial estático baliza 6. Agosto 2013.	51
Figura 5.2.1-B. GPS diferencial estático baliza 4. Agosto 2013.	52
Figura 5.2.1-C. GPS diferencial estático baliza 3. Agosto 2013.	52
Figura 5.2.1-D. Mapa indicando las balizas.	54
Figura 5.2.2-A. Medición con GPS estático de la baliza 7, agosto 2014.	55
Figura 6.1-A. Medición mediante GPR y DGPS cinemático. Agosto 2013.	61
Figura 6.1-B. Medición mediante GPR y DGPS cinemático. Agosto 2013.	61
Figura 6.2-A. Perfiles GPR de 2013 longitudinales y transversales.	65
Figura 6.2-B. Perfil longitudinal L001.	66
Figura 6.2-C. Perfil longitudinal L002.	67
Figura 6.2-D. Perfil longitudinal L003.	68
Figura 6.2-E. Perfil longitudinal L004.	69
Figura 6.2-F. Perfil longitudinal L005.	70
Figura 6.2-G. Perfil longitudinal L006.	71
Figura 6.2-H. Perfil longitudinal L007.	72
Figura 6.2-I. Perfil longitudinal L008.	73
Figura 6.2-J. Perfil longitudinal L009.	74
Figura 6.2-K. Perfil longitudinal L010.	75
Figura 6.2-L. Perfil longitudinal L011.	76
Figura 6.2-M. Perfil longitudinal L012.	77
Figura 6.2-N. Perfil longitudinal L013.	78
Figura 6.2-O. Perfil longitudinal L015.	79
Figura 6.2-P. Perfil longitudinal L016.	80
Figura 6.2-Q. Perfil longitudinal L017.	81
Figura 6.2-R. Perfil longitudinal L018.	82
Figura 6.2-S. Perfil longitudinal L019.	83
Figura 6.2-T. Perfil transversal T01.	84
Figura 6.2-U. Perfil transversal T02.	85
Figura 6.2-V. Perfil transversal T03.	86
Figura 6.2-W. Perfil transversal T04.	87
Figura 6.2-X. Perfil transversal T05.	88
Figura 6.2-Y. Perfil transversal T06.	89
Figura 6.2-Z. Profundidad del nivel freático interpretado a partir de los datos GPR de 2013.	90
Figura 6.2-AA. Profundidad de una capa de nieve o neviza, de edad desconocida, interpretada a partir de los datos GPR de 2013.	91
Figura 6.3-A. Perfiles GPR longitudinales de 2014.	94
Figura 6.3-B. Perfil Longitudinal L009.	95
Figura 6.3-C. Perfil Longitudinal L010.	96
Figura 6.3-D. Perfil Longitudinal L011.	97
Figura 6.3-E. Perfil Longitudinal L012.	98
Figura 6.3-F. Perfil Longitudinal L013.	99

Figura 6.3-G. Perfil Longitudinal L014..	100
Figura 6.3-H. Perfil Longitudinal L015..	101
Figura 6.3-I. Perfil Longitudinal L016..	102
Figura 6.3-J. Perfil Longitudinal L017..	103
Figura 6.3-K. Perfil Longitudinal L018..	104
Figura 6.3-L. Perfil Longitudinal L019..	105
Figura 6.3-M. Perfil Longitudinal L020..	106
Figura 6.3-N. Perfil Longitudinal L021..	107
Figura 6.3-O. Perfil Longitudinal L001..	108
Figura 6.3-P. Perfil Longitudinal L002..	109
Figura 6.3-Q. Perfil Longitudinal L003..	110
Figura 6.3-R. Profundidad del nivel freático interpretado a partir de los datos GPR de 2014..	111
Figura 6.4-A. Diagrama A, archivo L017.	112
Figura 6.4-B. Diagrama A, archivo L003	113
Figura 6.4-C. De arriba hacia abajo perfiles GPR longitudinales de los años 2013 y 2014..	115
Figura. 6.4-D. Comparación de los perfiles longitudinales de CHPN en las temporadas 2013 y 2014.	115
Figura 6.5-A. Área de estudio y datos utilizados para la determinación del nivel freático sobre la meseta central del CHPN.....	116
Figura 6.5.2-A. Resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Rafael.....	119
Figura 6.5.2-B. Histograma de resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Rafael.....	120
Figura 6.5.2-C. Resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Quintín.	121
Figura 6.5.2-D. Histograma de resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Quintín.	122
Figura 6.5.2-E. Resultados interpolados de nivel freático del glaciar Colonia.....	123
Figura 6.5.2-F. Histograma de resultados interpolados de nivel freático del glaciar Colonia.	124
Figura 7-A. Ubicación de la balizas instaladas en la ruta del levantamiento GPR y GPS, pozos de nieve y torres nivométricas.....	127
Fig. 7.1.2-A. Perfiles de densidad de la nieve en el Pozo 1 (Pozo San Rafael 2013, glaciar San Rafael cota 1160 m) y Pozo 2 (Pozo Colonia 2013, glaciar Colonia cota 1530 m), 2013.....	132
Fig. 7.1.2-B. Perfiles de temperatura de la nieve en el Pozo 1 (Pozo San Rafael 2013, cota 1160 m) y Pozo 2 (Pozo Colonia 2013, cota 1530 m), 2013.	133
Fig. 7.1.3-A. Perfiles de densidad de la nieve en el Pozo 1 (Pozo San Rafael 2014 cota 1152 m s.n.m) y Pozo 2 (Pozo Colonia 2014 cota 1526 m s.n.m.).	138
Fig. 7.1.3-B. Perfiles de temperatura de la nieve en el Pozo San Rafael 2014 (glaciar San Rafael cota 1152 m s.n.m.) y Pozo Colonia 2014 (glaciar Colonia cota 1526 m s.n.m.).....	139
Fig. 7.2.1-A. Esquema de la estructura de las torres nivométricas y disposición de los termistores (T), sensores de altura de nieve (Campbell SR50A) y data loggers (DL).	144
Figura 7.3.1-A. Toma de densidades por medio de tubo muestreador Monte Rosa, agosto 2013.	146
Figura 7.3.1-B. Toma de densidades por medio de tubo muestreador Monte Rosa, agosto 2014.	146
Figura 7.4-A. Ecuación lineal entre la densidad promedio en los primeros 4 m y la altitud basado en datos 2013.	150

Figura 7.4-B. Densidad promedio de los 4 m superficiales, imagen de fondo ASTER GDEM.	151
Figura 8.2-A. Profundidad promedio de la acumulación expresada como altura promedio de nieve anual (2009-2013), estimada con datos GPR, imagen de fondo ASTER GDEM.	154
Figura 8.2-B. Correlación entre altitud y profundidad anual de acumulación de nieve en la zona norte.	155
Figura 8.2-C. Correlación entre altitud y profundidad anual de acumulación de nieve en la zona sur.	155
Figura 8.2-D. Acumulación promedio (2009-2013) de altura de nieve (m) en la meseta de CHPN, imagen de fondo ASTER GDEM.	157
Figura 8.2-E. Acumulación promedio (2009-2013) en m eq.a. en la meseta de CHPN, imagen de fondo ASTER GDEM.	158
Fig. 9.2.1-A. Ubicación de las cámaras en el frente del glaciar San Rafael.	160
Figura 9.2.3-B. Fotografía adquirida por la Cámara 1, frente del glaciar San Rafael, el 13 de septiembre 2013 a las 10:26 AM hora local.	163
Figura 9.2.3-C. Fotografía adquirida por la Cámara 2, frente del glaciar San Rafael, el 16 de agosto de 2013, a las 15:38 hora local.	163
Figura 9.2.3-D. Fotografía adquirida por la cámara 1, frente del glaciar San Rafael, 16 de abril de 2014.	164
Figura 9.3.3-A. Ubicación cámaras en el frente del glaciar Colonia, aledaño al lago proglacial Colonia.	167
Figura 9.3.3-B. Fotografía adquirida por la cámara 1 en el glaciar Colonia, 28 de octubre de 2013 a las 13:41 h hora local, zona horaria GMT/UTC - 4:00.	168
Figura 9.3.3-C. Fotografía adquirida por la cámara 2 en el glaciar Colonia, 28 de octubre de 2013 a las 14:51 hora local, zona horaria GMT/UTC -4:00.	168
Figura 9.3.3-D. Fotografía adquirida por la cámara 2 (retirada por Geoestudios el 4 de septiembre de 2014) en el frente del glaciar Colonia el 20 de abril del 2014.	169
Figura 10.1-A. Ubicación del sensor de nivel en el lago proglacial Colonia, frente del glaciar Colonia.	172
Figura 10.1-B. Estado de la caja del datalogger conectado al sensor de nivel del lago proglacial Colonia el 25 de febrero de 2014.	173
Figura 10.1-C. Nuevo sensor de nivel instalado en el lago proglacial Colonia, 26 de febrero de 2014.	173
Figura 10.1-D. Caja con el datalogger nuevo del sensor de nivel del lago proglacial Colonia, 26 de febrero de 2014.	174
Figura 10.1-E. 4 de septiembre de 2014, lago proglacial Colonia, desmantelamiento de la estación de nivel de agua.	175
Figura 10.2-A. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, 27 de febrero al 31 de marzo de 2014.	175
Figura 10.2-B. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, abril de 2014.	176
Figura 10.2-C. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, mayo de 2014.	176
Figura 10.2-D. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, junio de 2014.	176
Figura 10.2-E. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, julio de 2014.	177
Figura 10.2-F. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia del 1 de agosto al 4 de septiembre de 2014. El peak del 19 de agosto corresponde a un GLOF del lago Cachet II.	177
Figura 10.3-A. Ubicación del sensor de nivel de agua antiguo en el muelle de la laguna San Rafael (Nivel SLR 1) y el sensor de nivel nuevo (Nivel LSR 2) en una isla marginal de la laguna San Rafael.	179

Figura 10.3-B. Muelle y lugar de instalación del datalogger del antiguo sensor de nivel de agua.	180
Figura 10.3-C. Datalogger y caja Pelikan junto al panel solar, de la antigua estación de nivel de agua.	180
Figura 10.3-D. Panel solar y caja Pelikan, nueva estación de nivel de agua.	181
Figura 10.3-E. datalogger y caja Pelikan, nueva estación de nivel de agua.	182
Figura 10.4-A. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de mayo 2012.	183
Figura 10.4-B. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de junio 2012.	184
Figura 10.4-C. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de julio 2012.	184
Figura 10.4-D. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de agosto 2012.	185
Figura 10.4-E. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de septiembre 2012.	185
Figura 10.4-F. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de octubre 2012.	186
Figura 10.4-G. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de noviembre 2012.	186
Figura 10.4-H. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de diciembre 2012.	187
Figura 10.4-I. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de enero 2013.	187
Figura 10.4-J. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de febrero 2013.	188
Figura 10.4-K. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de marzo 2013.	188
Figura 10.4-L. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de abril 2013.	189
Figura 10.4-M. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de mayo 2013.	189
Figura 10.4-N. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de junio 2013.	190
Figura 10.4-O. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de julio 2013.	190
Figura 10.4-P. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de agosto 2013.	191
Figura 10.4-Q. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de septiembre 2013.	191
Figura 10.4-R. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de octubre 2013.	192
Figura 10.4-S. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de noviembre 2013.	192
Figura 10.4-T. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de diciembre 2013.	193
Figura 10.4-U. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de enero 2014.	193
Figura 10.4-V. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de febrero 2014.	194
Figura 10.4-W. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de abril 2014.	196
Figura 10.4-X. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de mayo 2014.	196
Figura 10.4-Y. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de junio 2014.	197
Figura 10.4-Z. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de julio 2014.	197
Figura 10.4-AA. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de agosto y primeros días de septiembre 2014.	198
Figura 11.1-A. Estaciones meteorológicas (AWS) utilizadas en el modelo de acumulación y ablación.	202
Figura 11.2.1-A. Temperaturas del aire y nieve registradas en la Torre 1.	205
Figura 11.2.1-B. Altura de nieve registrada en la Torre 1 (San Rafael).	205
Figura 11.2.2-A. Altura de nieve horaria estimada para la Torre Colonia y medida en la Torre San Rafael.	206
Figura 11.2.3-A. Datos de precipitación horaria medidos y rellenados en las estaciones laguna San Rafael (LSR) y Puerto Aysén (PA).	207
Figura 11.2.3-B. Datos de precipitación diaria medidos y rellenados en las estaciones laguna San Rafael (LSR) y Puerto Aysén (PA).	207

Figura 11.2.3-C. Datos de precipitación diaria medidos y rellenados en las estaciones Río Colonia en Nacimiento (RC) y Baker en Angostura Chacabuco (BC).	208
Figura 11.2.3-D datos de precipitación diaria medidos y rellenos en las estaciones Río Nef antes Junta Estero Rebalse (RN), Puerto Chacabuco (CT) y Cochrane en Cochrane (CC).	209
Figura 11.2.4.3-A. Balances diarios observados y estimados con los modelos.	212
Figura 11.2.4.4-A. Grilla topográfica SRTM utilizada para la extrapolación del modelo de acumulación-ablación.	214
Figura 11.2.4.4-B. Zonas representativas de cada modelo: NO, NE, SO, SE.	215
Figura 11.2.4.4-C. Precipitación acumulada en m eq.a.	216
Figura 11.2.4.4-D. Balance superficial estimado con el modelo.	217
Figura 12.1-A. Área de estudio con los tracks DGPS establecidos originalmente en las bases del estudio en los glaciares San Rafael y Colonia.	219
Figura 12.2-A. Perfil topográfico del glaciar San Rafael realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014.	221
Figura 12.2-B. Detalle del perfil topográfico del glaciar San Rafael realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014.	222
Figura 12.2-C. Perfil topográfico del glaciar San Quintín realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014.	223
Figura 12.2-D. Perfil topográfico del glaciar San Quintín realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2011, 2013 y 2014.	224
Figura 12.2-E. Detalle del perfil topográfico del glaciar San Quintín realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014.	225
Figura 12.2-F. Perfil topográfico del glaciar Colonia realizado con cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2011, 2013 y 2014.	226
Figura 12.2-G. Detalle de perfil topográfico del glaciar Colonia realizado con los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2013 y 2014.	227
Figura 12.2.1.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Rafael. La altura elipsoidal corresponde a la del año 2014 y está referida al sistema WGS84.	228
Figura 12.2.1.1-B. Distribución espacial de dh (2014-2010) en el glaciar San Rafael.	229
Figura 12.2.1.2-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Rafael. La altura elipsoidal corresponde a la del año 2014 y está referida al sistema WGS84.	230
Figura 12.2.1.2-B. Distribución espacial de dh (2014-2010) en el glaciar San Quintín. La escala de colores desde burdeo a amarillo indica de mayor a menor adelgazamiento.	231
Figura 12.2.2.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2011 en el glaciar Colonia.	232
Figura 12.2.2.1-B. Distribución espacial de dh (2014-2011) en el glaciar Colonia.	233
Figura 12.2.3.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2011 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Rafael.	234

Figura 12.2.3.1-B. Distribución espacial de dh (2011-2010) en glaciar San Rafael. La escala de colores desde rojo a amarillo indica de mayor a menor adelgazamiento.....	235
Figura 12.2.3.2-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2011 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Quintín.	236
Figura 12.2.3.2-B. Distribución espacial de dh (2011-2010) en el glaciar San Quintín.....	237
Figura 12.2.4-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013.....	238
Figura 12.2.4.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013 en el glaciar San Rafael.	239
Figura 12.2.4.1-B. Distribución espacial de dh (2014-2013) en el glaciar San Rafael..	240
Figura 12.2.4.2-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013 en el glaciar San Quintín..	242
Figura 12.2.4.2-B. Distribución espacial de dh (2014-2013) en el glaciar San Quintín.....	243
Figura 12.2.4.3-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013 en el glaciar Colonia.....	244
Figura 12.2.4.3-B. Detalle de diferencia de altura (dh) en transecta transversal del glaciar Colonia.	245
Figura 12.2.4.3-C. Distribución espacial de dh (2014-2013) en glaciar Colonia.	246
Figura 13.1-A. Área de estudio en la zona de acumulación de los glaciares San Rafael y Colonia y ubicación de datos LIDAR proporcionados por la DGA.....	250
Figura 13.2-A. Resultados de la diferencia de altura (dh) obtenida en la comparación de los DEM LIDAR en el área de estudio.	253
Figura 13.2-B. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM 2012 (CECs) y 2011 (SAF) en el glaciar San Rafael..	254
Figura 13.2-C. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM 2012 (CECs) y 2011 (SAF) en el glaciar Colonia..	255
Figura 13.2-D. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar San Rafael.	256
Figura 13.2-E. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar Colonia.....	256
Figura 13.2-F. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM Digimapas y CECs en el glaciar San Rafael.	257
Figura 13.2-G. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM Digimapas y CECs en el glaciar Colonia..	258
Figura 13.2-H. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar San Rafael.	259
Figura 13.2-I. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar Colonia.....	259
Figura 13.2.1-A. Sectores levantados mediante LIDAR por la empresa Digimapas en 2012/2013, sobrepuestos a los recorridos GPS cinemáticos medidos durante este estudio en el periodo 23 de agosto al 3 de septiembre de 2013.....	262
Figura 13.2.1-B. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2013 y los datos LIDAR de 2012/2013.....	263
Figura 13.2.1-C. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2013 y los datos LIDAR Digimapas de 2012/2013..	264

Foto A1.2-A. 1ª Campaña 2013. Agosto. Descarga de equipos desde L/M Danubio Azul al muelle de Laguna San Rafael (LSR).	278
Foto A1.2-B. 1ª Campaña 2013. Agosto. Traslado de moto de nieve como carga colgante desde LSR a Estación Glaciológica Glaciar San Rafael (EGGSR).....	278
Foto A1.2-C. 1ª Campaña 2013. Agosto. Los 2 refugios en EGGSR.....	279
Foto A1.2-D. 1ª Campaña 2013. Agosto. Exterior del módulo dormitorio en EGGSR.	279
Foto A1.2-E. 1ª Campaña 2013. Agosto. Interior del módulo comedor en EGGSR.	280
Foto A1.2-F. 1ª Campaña 2013. Agosto. Estación meteorológica automática en EGGSR. En primer plano la base DGPS.	280
Foto A1.2-5-G. 1ª Campaña 2013. Agosto. Pozo 1.	281
Foto A1.2-H. 1ª Campaña 2013. Agosto. Traslado de Torre 1 sobre trineos.....	281
Foto A1.2-I. 1ª Campaña 2013. Agosto. Torre 1 instalada.....	282
Foto A1.2-J. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Instalación Torre 2.	282
Foto A1.2-5-K. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Torre 2 instalada.	283
Foto A1.2-L. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Medición mediante GPR y DGPS cinemático.	283
Foto A1.2-M. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Medición mediante GPR y DGPS cinemático.	284
Foto A1.2-N. 1ª Campaña 2013. Agosto. Medición de puntos con instalación de baliza mediante DGPS estático.	284
Foto A1.2-O. 1ª Campaña 2013. Agosto. Cámara 1, glaciar San Rafael. Corresponde a la primera instalación.....	285
Foto A1.2-P. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Cámara 1, glaciar San Rafael. Corresponde a la segunda instalación (definitiva).	285
Foto A1.2-Q. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Foto del glaciar San Rafael adquirida con la Cámara 1.	286
Foto A1.2-R. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Cámara 2, glaciar San Rafael.	286
Foto A1.2-S. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Cámara 2, glaciar San Rafael.	287
Foto A1.2-T. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Foto del glaciar San Rafael adquirida con la Cámara 2.	287
Foto A1.2-U. 1ª Campaña 2013. Agosto. Cabaña CONAF, LSR.	288
Foto A1.2-V. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Maniobra de carga de la Barcaza Doña Lía en la playa de LSR.	288
Foto A2.2-A. 2ª Campaña 2013. Octubre. Cámara 1 en el frente del glaciar Colonia.....	290
Foto A2.2-B. 2ª Campaña 2013. Octubre. Cámara 2 en el frente del glaciar Colonia.....	290
Foto A3.2-A. 3ª Campaña 2014. Febrero. Cámara 1 LSR.	293
Foto A3.2-B. 3ª Campaña 2014. Febrero. Cámara 2 LSR.	293
Foto A3.2-C. 3ª Campaña 2014. Febrero. Cruce lago Colonia.	294
Foto A3.2-D. 3ª Campaña 2014. Febrero. Bloque de hielo entre lago Colonia y lago proglacial Colonia.	294
Foto A3.2-E. 3ª Campaña 2014. Febrero. Estado caja datalogger sensor de nivel lago proglacial Colonia.	295
Foto A3.2-F. 3ª Campaña 2014. Febrero. Nuevo sensor de nivel lago proglacial Colonia.....	295
Foto A3.2-G. 3ª Campaña 2014. Febrero. Caja datalogger nuevo sensor de nivel lago proglacial Colonia.	296
Foto A3.2-H. 3ª Campaña 2014. Febrero. Trabajo en cámara 2 lago proglacial Colonia.....	296

Foto A4.2-A. 4ª Campaña 2014. 13 de agosto 2014, arribo de la L/M Austral II al muelle en laguna San Rafael.....	303
Foto A4.2-B. 4ª Campaña 2014. 13 de agosto 2014, descarga de equipo en laguna San Rafael.	303
Foto A4.2-C. 4ª Campaña 2014. 16 de agosto 2014, mantención y descarga de fotos cámara fotográfica 1 en el frente del glaciar San Rafael.....	304
Foto A4.2-D. 4ª Campaña 2014. Fotografía adquirida por la cámara fotográfica 1 instalada en el frente del glaciar San Rafael 16 de abril del 2014.....	304
Foto A4.2-E. 4ª Campaña 2014. 21 de agosto 2014, ingreso a EGGSR, meseta CHPN.	305
Foto A4.2-F. 4ª Campaña 2014. 21 de agosto 2014, estado de los módulos a la llegada a EGGSR.	305
Foto A4.2-G. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, estado en que se encontraba la Torre 1 al llegar al lugar.	306
Foto A4.2-H. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, Pozo 1: densidad y estratigrafía.....	306
Foto A4.2-I. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, inicio mediciones GPR en EGGSR.	307
Foto A4.2-J. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, mediciones GPR y GPS perfil longitudinal.	307
Foto A4.2-K. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, estado de la Torre 2 al llegar al lugar.	308
Foto A4.2-M. 26 de agosto 2014, mediciones de densidad en Pozo 2.....	308
Foto A4.2-N. 4ª Campaña 2014. 26 de agosto 2014, excavación para recuperar Torre 1.....	309
Foto A4.2-O. 4ª Campaña 2014. 28 de agosto 2014, excavación para recuperar Torre 2.....	309
Foto A4.2-P. 4ª Campaña 2014. 28 de agosto 2014, mediciones DGPS.	310
Foto A4.2-Q. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, llegada de equipo DGA a EGGSR y partida de 2 integrantes de Geoestudios.	310
Foto A4.2-R. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, llegada a playa en el frente del glaciar Colonia.....	311
Foto A4.2-S. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, frente del glaciar Colonia, desmantelamiento de la estación de nivel de agua.....	311
Foto A4.2-T. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, frente del glaciar Colonia, desmantelamiento de cámara fotográfica.	312
Foto A4.2-V. 4ª Campaña 2014. Fotografía adquirida por la cámara 2 (retirada por Geoestudios el 4 de septiembre de 2014) en el frente del glaciar Colonia el 20 de abril del 2014.	312
Foto A4.2-V. 4ª Campaña 2014. 6 de septiembre 2014, descarga de datos estación de nivel de agua laguna San Rafael.....	313

RESUMEN

El presente Informe Final describe los resultados del estudio denominado "Caracterización Física del Manto Nival en Campo de Hielo Norte en Base a Mediciones GPR Terrestre", realizado por Geoestudios Ltda. en 2013 y 2014 para la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA). El Campo de Hielo (Patagónico) Norte (CHPN), con un área de 3.953 km² el año 2001, es la segunda mayor masa de hielo de Sudamérica. El objetivo principal del estudio es medir la acumulación nival y su equivalente en agua en la zona de acumulación (meseta) del CHPN, en 7 perfiles de una longitud total de 78 km en los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia, por medio de un radar de penetración terrestre (GPR) de una frecuencia de 200 MHz.

En prácticamente toda la zona de estudio se observa en los datos GPR un reflector prominente a una profundidad entre 9 m y 42 m, que es claramente identificable en forma muy continua a lo largo de los perfiles. Este reflector se interpreta que corresponde al nivel freático ya descrito por glaciólogos japoneses que realizaron en 1985 una perforación en el glaciar San Rafael a cota 1300 m, y que representa 4 años de acumulación de nieve según dichos análisis. Por lo tanto la acumulación anual promedio de nieve en el periodo de 4 años entre 2010 y 2013 varía, según las mediciones GPR, entre 2,3 y 10,5 m/año. Basado en una densidad promedio de 0,6 g/cm³ para la capa de neviza y nieve sobre el nivel freático, según los resultados de los japoneses y de pozos de nieve de 4 m de profundidad medidos en este estudio en 2013 y 2014, se obtienen acumulaciones anuales entre 1,4 m y 6,3 m eq.a. (equivalente en agua) para la zona de estudio. Estos valores, que son razonables y se ajustan bien a distintas estimaciones y modelos previos, fueron extrapolados a toda la meseta de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia.

En agosto 2013 se instaló una torre metálica de 18 m de longitud (5 m sobre la superficie) en el glaciar San Rafael (1160 m s.n.m.) y otra de 16 m de longitud (8 m sobre la superficie) en el glaciar Colonia (1530 m s.n.m.). Ambas torres fueron encontradas 1 año después, midiéndose una acumulación anual de 1,8 m en San Rafael y 7,5 m de nieve en Colonia, que equivale a 0,8 m eq.a. y 3,6 m eq.a., respectivamente. Estas son las primeras mediciones directas conocidas de acumulación anual de nieve en la meseta de CHPN. Los resultados de este estudio, que incluyen también un balance de

energía, un modelo simple de balance de masa y balances de masa geodésico, entre otros, permiten definir con mejor detalle las características glaciológicas de CHPN y sus recursos hídricos asociados.

1. INTRODUCCIÓN

La acumulación nival y su equivalente en agua son parámetros esenciales para caracterizar un glaciar. El Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), oficialmente llamado Campo de Hielo Norte, con un área de 3.953 km² el año 2001 (Rivera *et al.*, 2007), es la segunda mayor masa de hielo en Chile. Conforme a los lineamientos establecidos en la Estrategia Nacional de Glaciares (ENG), la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA) licitó el presente estudio (DGA, 2013) con la finalidad de medir la acumulación nival y su equivalente en agua en la zona de acumulación del CHPN, en 1 perfil longitudinal y 6 perfiles transversales en los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia, por medio de mediciones mediante radar de penetración terrestre (GPR). Se incluye también en la licitación el balance de energía en el sitio de una estación meteorológica automática en la zona de acumulación del glaciar San Rafael, la aplicación de un modelo simple de balance de masa en base a precipitación y temperatura para el glaciar San Rafael y el balance de masa geodésico en las 7 transectas a partir de datos de elevación proporcionados por la DGA correspondientes a años anteriores. Las mediciones se enmarcan en el cumplimiento de lo que podemos considerar el Nivel 2 de la ENG.

1.1. CONTRATO

El presente Informe Final describe el estudio realizado en el marco de la Licitación 1019-60-LP13 denominada "Caracterización Física del Manto Nival en Campo de Hielo Norte en Base a Mediciones GPR Terrestre" adjudicada a la empresa Geoestudios Ltda., cuyas bases administrativas y técnicas fueron aprobadas por la Resolución DGA (exenta) N° 1224.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio, solicitado por la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, tiene como finalidad medir la acumulación nival anual y su equivalente en agua, un parámetro esencial para caracterizar un glaciar, en la zona de acumulación del CHPN, mediante mediciones realizadas con radar de penetración

terrestre (GPR) a lo largo de un perfil longitudinal entre los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia (46,3 km), y en 6 perfiles transversales de un largo promedio de 5,3 km cada uno (Fig. 1.2-A).

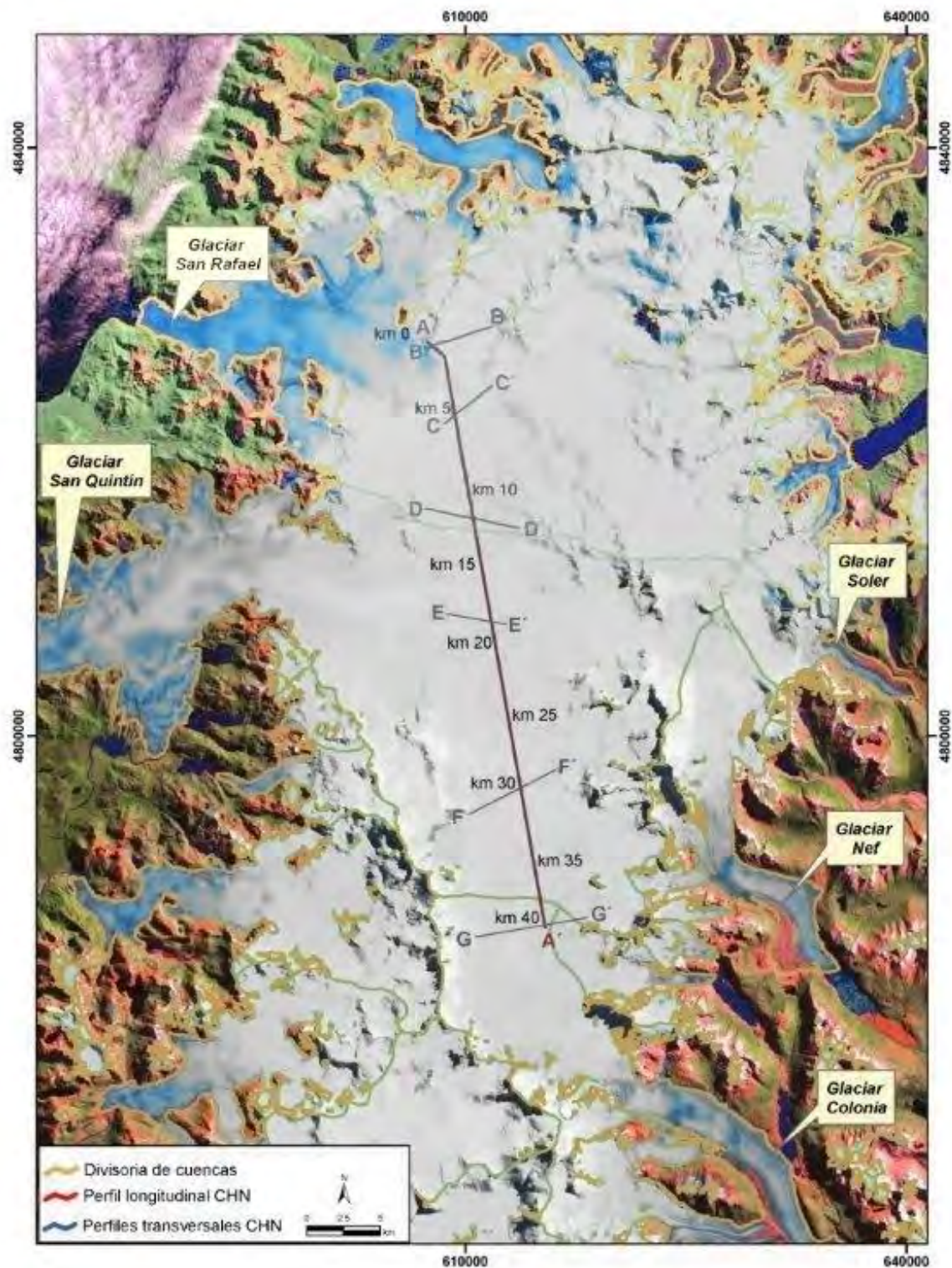


Figura 1.2-A. Imagen satelital del Campo de Hielo Patagónico Norte con indicación de las transectas a realizar en el estudio.

La información obtenida permitirá incrementar el conocimiento técnico-científico sobre la zona de acumulación de los glaciares del estudio, situados dentro de la subzona glaciológica Austral A, en el contexto de los objetivos de la Estrategia Nacional de Glaciares (DGA, 2009).

Los objetivos específicos incluyen:

- a) Realizar mediciones de estratigrafía interna y caracterización de detalle del manto nival mediante radar de penetración terrestre (GPR) a lo largo de un perfil longitudinal entre los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia (46.3 km), y en 6 perfiles transversales (de un largo acumulado de 32 km).
- b) Realizar mediciones terrestres con el sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) a lo largo de los mismos perfiles GPR longitudinal y transversales.
- c) Determinar la acumulación nival para el periodo 2013/2014 y su equivalente en agua, utilizando 2 torres nivométricas, mediciones GPR en las transectas y mediciones de densidad a lo largo de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia.
- d) Analizar información climatológica para determinar el balance de energía y aplicar un modelo simple de balance de masa en base a precipitación y temperatura.
- e) Mantener y descargar datos de estaciones meteorológicas ubicadas en la meseta de CHPN y en Laguna San Rafael.
- f) Monitorear el frente terminal de los glaciares San Rafael y Colonia mediante cámaras fotográficas con intervalómetro.

1.3. CONTENIDO DEL PRESENTE INFORME

Según los requerimientos de las Bases Técnicas del estudio, el presente informe se presenta los resultados finales obtenidos a la fecha en cada una de las zonas de estudio del proyecto, que incluye lo siguiente:

- ✓ Mediciones con GPR terrestre, del espesor de manto nival de la temporada 2013 para una transecta longitudinal de 46,3 km, y 6 transectas transversales de una distancia acumulada de 32 km.
- ✓ Mediciones de elevación DGPS (GPS diferencial) en las mismas transectas GPR.
- ✓ Mediciones de acumulación, mediante dos torres nivométricas instaladas en

ambos extremos del perfil AA', Fig. 1.2-A, con 2 termistores para medir temperatura del aire y 2 termistores para medir temperatura del manto nival en profundidad.

- ✓ Mediciones de densidad con tubo muestreador tipo Monte Rosa en 9 puntos marcados con balizas temporales.
- ✓ 2 pozos estratigráficos para caracterizar el manto nival.
- ✓ Análisis de mediciones meteorológicas como antecedente para determinar el balance de energía y aplicar un modelo simple de balance de masa en base a precipitación y temperatura.
- ✓ Monitoreo fotográfico con cámaras equipadas con intervalómetro del frente del glaciar San Rafael y del frente del glaciar Colonia.
- ✓ Monitoreo del nivel de agua en la Laguna San Rafael y el lago proglacial del glaciar Colonia.
- ✓ Bitácora de las campañas realizadas a la fecha.
- ✓ Metodología para modelar la acumulación y ablación en CHPN.

También se deben entregar los siguientes productos:

- ✓ a) Perfiles esquemáticos con la caracterización de detalle del manto nival en la zona de estudio. El Contratista entregará el detalle de la estratigrafía observada en cada transecta realizada. Se entregarán imágenes esquemáticas con los perfiles realizados y toda la información digital generada. Las actividades realizadas deberán quedar plasmadas en un set de al menos 30 fotografías en formato raw que serán entregadas a la DGA.
- ✓ b) Radargramas georeferenciados con las profundidades de la nieve-hielo para las transectas realizadas. Los radargramas obtenidos serán entregados en el formato digital correspondiente, según el programa utilizado, junto con toda la información digital generada para el procesamiento y depuración de los datos.
- ✓ c) Transectas realizadas en formato *.shp con escala de colores que indique las profundidades encontradas y la elevación.
- ✓ d) Estimación del volumen de nieve y su equivalente en agua para cada glaciar monitoreado para el área de estudio, indicando los errores asociados. Del mismo modo, esta estimación deberá ser extrapolada a la superficie total de los glaciares en estudio.
- ✓ e) Cambios de elevación en la zona de acumulación de los glaciares San Rafael y Colonia. La DGA dispone de información de transectas GPS realizada los

años 2010, 2011 y 2012, además de información LIDAR. El Contratista determinará el cambio de elevación observado de acuerdo a la información de terreno disponible, incluyendo la información obtenida de la transecta a realizar el año 2013.

- ✓ f) Análisis estratigráfico del manto nival y estimación de la acumulación en la meseta.
- ✓ g) A partir de la información obtenida en el pozo estratigráfico, el Contratista realizará un análisis de la temperatura y densidad en profundidad, estimando los equivalentes de agua disponible para cada nivel encontrado.
- ✓ h) Determinar la cantidad de nieve acumulada para el periodo en que el equipo de trabajo se encuentre en la meseta y estimar la densidad de la nieve según latitud y longitud para los trabajos realizados con el taladro Monte Rosa, realizando la entrega de un mapa de densidad.
- ✓ i) Se plasmarán las actividades realizadas en un set de al menos 20 fotografías, que será entregado a la DGA.
- ✓ j) Estimar la acumulación de todo el periodo invernal utilizando la información capturada en terreno, los datos disponibles de precipitación y temperatura de la estación Glaciar San Rafael y la información disponible de las estaciones en la meseta de CHN. Para conseguir el objetivo, el Contratista aplicará un modelo empírico según lo señalado por Rasmussen (2009) para obtener un ratio de precipitación agua/nieve por medio de la estimación de un rango de temperatura con la formulación del modelo grado-día.
- ✓ k) Balance de energía en la zona de acumulación del glaciar San Rafael.
- ✓ l) Se tiene información de las condiciones meteorológicas en la meseta del glaciar San Rafael desde el año 2010. El Contratista determinará el balance de energía para el área en estudio apoyándose de los datos de las estaciones sobre la meseta.
- ✓ m) Mantención y descarga de datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en la meseta del glaciar San Rafael. Al término del estudio, ambas estaciones se deben encontrar operando correctamente.
- ✓ n) El Contratista guardará un registro fotográfico del estado de las estaciones, las actividades de mantenciones realizadas y el estado final de las estaciones antes de que finalicen las actividades terrestres.
- ✓ o) Mantención y descarga de datos de los sensores de nivel en Laguna San Rafael y Glaciar Colonia. Al término del estudio, ambas estaciones deben

encontrarse operando correctamente.

- ✓ p) Bitácora de terreno con las actividades realizadas. El Contratista hará entrega de una bitácora detallada de terreno con todas las actividades realizadas, en la que se registrarán los inconvenientes encontrados, así como las oportunidades presentadas. Se dejará registro de los instrumentos reemplazados, con su número de serie, y de las mantenciones efectuadas.
- ✓ q) Si hubiere instrumentos reemplazados, éstos deben ser devueltos a la DGA en un embalaje adecuado antes de que finalice el estudio.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en la XI Región de Aysén, en la zona glaciológica Austral A (Estrategia Nacional de Glaciares, 2009), en el Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), que se extiende a través de un área de 3.953 km² (Rivera *et al.*, 2007). Se ubica entre cumbres y depresiones que forman parte de la Cordillera de los Andes en la Patagonia, incluyendo el Monte San Valentín (4.032 m, el más alto de la Patagonia, según mediciones DGPS efectuadas por el Jefe de Proyecto en 2007), Monte Fiero, Monte Arco, Cerro Arenales, Cerro Pared Norte, etc. Se originan en el CHPN 24 glaciares efluentes principales que fluyen a través de valles que atraviesan los cordones montañosos (Rivera *et al.*, 2007).

Las coordenadas geográficas que demarcan el área de estudio en el meseta del CHPN, expresadas en coordenadas UTM son E 607.516 m y N 4.826.608 m para la Estación Glaciológica Glaciar San Rafael (EGGSR), y E 614.645 m, N 4.786.997 m para la estación de la torre nivométrica ubicada aledaña al sitio del "Pozo 2" en la zona alta del glaciar Colonia. La altitud del área de estudio oscila entre los 1100 y 1500 m.

3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se ilustra en la Tabla el cronograma de actividades correspondiente al estudio. En el Anexo 5 se resumen los resultados logrados en las 4 campañas a Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN). Se realizaron 2 campañas a la meseta utilizando como base la Estación Glaciológica Glaciar San Rafael (EGGSR), en 2013 y 2014; y dos campañas a la periferia, lago proglacial Colonia 2013 y lago proglacial Colonia más laguna San Rafael (LSR) en 2014.

Tabla 3-A. Cronograma de actividades.

ACTIVIDAD	COMIENZO	FIN
Inicio contrato	03 julio 2013	
Protocolo de seguridad	01 julio 2013	31 julio 2013
Análisis funcionamiento de instrumentos y estaciones	01 julio 2013	31 julio 2013
Preparación Informe N°1 "Protocolo de Seguridad"	01 julio 2013	08 agosto 2013
Entrega Informe N°1	08 agosto 2013	
Campaña N°1 (2013) meseta CHPN	07 agosto 2013	17 septiembre 2013
Entrega reporte al Inspector Fiscal campaña de terreno meseta CHPN 2013	4 octubre 2013	
Campaña N° 2 (2103) lago proglacial Colonia	27 octubre 2013	30 octubre 2013
Preparación Informe N° 2	23 septiembre 2013	10 noviembre 2013
Capacitación de análisis de radar a personal UGN DGA	13 noviembre 2013	
Entrega Informe N°2	11 noviembre 2013	
Revisión por parte de DGA	11 noviembre 2013	21 noviembre 2013
Correcciones y entrega definitiva	21 noviembre 2013	28 noviembre 2013
Campaña N°3 (2014) laguna San Rafael y lago proglacial Colonia	23 febrero 2014	26 febrero 2014
Entrega reporte al Inspector Fiscal campaña 2014 San Rafael y Colonia	17 Marzo 2014	
Campaña N° 4 (2014) meseta CHPN	06 Agosto 2014	12 Septiembre 2014
Análisis de datos	16 septiembre 2014	31 Octubre 2014
Entrega reporte al Inspector Fiscal campaña de terreno meseta CHPN 2014	30 septiembre 2014	
Preparación Informe Final	16 septiembre 2014	2 noviembre 2014
Entrega Informe Final	3 noviembre 2014	
Revisión por parte de DGA	3 noviembre 2014	18 noviembre 2014
Correcciones y entrega final	19 noviembre 2014	25 noviembre 2014

4. BALANCE DE ENERGÍA Y METEOROLOGÍA

4.1. METODOLOGÍA

Se estimó el balance de energía puntal en el sitio de la estación meteorológica instalada por la DGA en la meseta del glaciar San Rafael (EGGSR) en las coordenadas UTM 18G E 607.516, N 4.826.608 a 1200 m s.n.m. aproximadamente, Fig. 4.1-A. En dicho sitio, más concretamente en el mismo mástil, existen dos estaciones meteorológicas automáticas independientes: una de marca Campbell (solo con datalogger) y una de marca Vaisala con datalogger y conectada en línea a la red DGA via el satélite GOES. Los datos utilizados en el balance de energía descrito a continuación corresponden principalmente a aquellos de la estación Campbell, (que son para San Rafael más completos que los de la estación Vaisala, puesto que contienen información de viento, temperatura y humedad relativa a dos niveles, al contrario de la estación Vaisala que solamente contiene dichos datos a un solo nivel, y cuyas mediciones de radiación son solo netas). Sin embargo, en los casos cuando no existen datos de la estación Campbell se utilizaron los datos registrados por la estación Vaisala. Para cada variable utilizada se especifica la procedencia de los datos por periodos.

La estación meteorológica Campbell instalada por la DGA en la meseta del glaciar San Rafael (EGGSR) cuenta con los siguientes sensores:

- Sensor de velocidad y dirección del viento (a 2 m y 4 m)
- Sensor de temperatura (a 2 m y 4 m)
- Sensor de humedad relativa (a 2 m y 4 m)
- Sensor de radiación de onda corta incidente y reflejada
- Sensor de radiación de onda larga incidente y emitida
- Sensor de altura de nieve.

Los sensores Campbell a 4 m de altura no registraron datos adecuados, por lo que fueron descartados. Efectivamente, el termómetro a 4 m registró siempre -75°C, la HR a 4 m fue siempre de -25% y el anemómetro a 4 m registró generalmente valores por debajo de los valores de viento a 2 m e incluso valores negativos en ocasiones. El periodo de registro de datos descargados de la estación meteorológica Campbell, en la campaña realizada a la meseta del CHPN en invierno de 2013, es entre el 16 de noviembre 2012 y

el 11 de septiembre de 2013. Y el periodo de registro de datos descargados de la estación Campbell en la campaña de invierno de 2014 finaliza el 4 de septiembre de 2014.

La estación Vaisala cuenta con datos entre el periodo del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014, por lo que se utilizaron los datos registrados por la estación Vaisala en los periodos que la estación Campbell no cuenta con datos.

La estación meteorológica Vaisala instalada por la DGA en la meseta del glaciar San Rafael (EGGSR) cuenta con los siguientes sensores:

- Sensor de velocidad y dirección del viento (a 2 m)
- Sensor de temperatura (a 2 m)
- Sensor de humedad relativa (a 2 m)
- Sensor de radiación de onda corta neta
- Sensor de radiación de onda larga neta.

Por lo tanto, el periodo de estudio comprende desde el 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.

En las Figs. 4.1-B y C se presentan fotografías de la estación meteorológica conformada por una torre con sensores a 2 m y 4 m, y a unos 5 m de distancia un marco con sensor de altura y radiómetro. Tanto la torre como el marco están instalados sobre un nunatak de roca, alledaño al refugio EGGSR.

La ecuación utilizada para la estimación del balance de energía es la siguiente:

$$Q_M = R_{Snet} + R_{Lnet} + Q_S + Q_L + Q_P$$

Donde Q_M es la energía disponible para la fusión, R_{Snet} es el balance de la radiación de onda corta, R_{Lnet} es el balance de radiación de onda larga, Q_S es el flujo de calor sensible, Q_L es el flujo de calor latente y Q_P es el calor aportado por la precipitación. En este estudio no se consideró el cálculo de Q_P ya que en la mayoría de los casos se considera despreciable (Cuffey and Paterson, 2010) y no se cuenta con una medida de la temperatura de las precipitaciones líquidas que permita la adecuada estimación de el aporte de calor de las precipitaciones. De hecho, la temperatura del aire a 2 m no es una

buena aproximación ya que puede llevar a sobreestimar este aporte puesto que la temperatura real de la precipitación refleja más bien las condiciones atmosféricas en las nubes donde se originó. La ecuación que define a Q_M corresponde a la ecuación general utilizada en balance de energía superficial (Oerlemans, 2010 y Brock & Arnold, 2000).

El cálculo de los flujos turbulentos se realizó utilizando el método "bulk" (Cuffey y Paterson, 2010). Este método recibe su nombre basado en la hipótesis que la capa superficial es representada por los valores de humedad específica (q), la temperatura del aire (T_a) y velocidad del viento (v) medidas en un solo nivel. Se prefirió este método, al método de perfilaje puesto que no siempre se contó con datos confiables de los dos anemómetros instalados, según se verá más adelante.

Las ecuaciones utilizadas para calcular los flujos turbulentos con estos métodos se presentan a continuación (Cuffey & Paterson, 2010):

$$Q_s = \frac{\rho * C_p * k^2 * v * (T_a - T_s)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) * \ln\left(\frac{z}{z_{0t}}\right)}$$

$$Q_L = \frac{\frac{0,623}{P} * \rho * L_{v/s} * k^2 * v * (e_a - e_s)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) * \ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right)}$$

Donde Q_s es el flujo de calor sensible y Q_L el flujo de calor latente, ρ es la densidad del aire (kg/m^3), C_p es el calor específico del aire $1010 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, P es la presión atmosférica, k es la constante de von Karman ($0,41$), T_a es la temperatura del aire medida a la altura z , T_s es la temperatura superficial, v es la velocidad del viento, $L_{v/s}$ es el calor específico latente de sublimación igual al calor latente específico de evaporación (2500 J/g o $400 \text{ cal/(g}\cdot\text{°C)}$) más el calor específico de fusión del hielo (334 J/g o $79,7 \text{ cal/(g}\cdot\text{°C)}$), e_a es la presión de vapor del aire a la altura z y e_s es la presión de vapor en la superficie (que se supone igual a la saturación), z_0 corresponde a la altura a la cual la velocidad del viento es igual a cero, también conocida como rugosidad superficial. Basado en Cuffey & Paterson, se asumió $z_0 = 0,0005 \text{ m}$, correspondiente a un valor promedio para neviza. z_{0t} es la altura a la cual la temperatura del aire es igual a la temperatura superficial y z_{0m} es la altura a la cual el momentum es cero. z_{0t} y z_{0m} se consideran igual a $0,01 z_0$, vale decir $0,005 \text{ mm}$ (Cuffey & Paterson, 2010).

Para la estimación del flujo de calor latente se utilizó una presión constante igual a 877 hPa según la fórmula del gradiente de presión en una atmosfera isotermal.

Para el cálculo del calor latente se considera que existe sublimación solo en el caso que la suma de los otros flujos sea positiva y exista energía disponible. En el caso de no existir energía disponible se considera que el flujo de calor latente es cero o podría existir condensación. Una vez que se satisface la sublimación el excedente de energía disponible se utiliza en fusión.

La presión de vapor saturado (e_s) se estima con la ecuación empírica de Bolton (1980) que se presenta a continuación:

$$e_s = 6,112 * EXP\left(\frac{17,67 * T_a}{T_a + 243,5}\right)$$

Donde T_a es la temperatura del aire en °C y e_s está expresada en hPa, mientras que EXP es la función exponencial.

La densidad del aire se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{P_{a.seco}}{K_{as} * T_a} + \frac{P_{vap.agua}}{K_{va} * T_a}$$

Donde ρ es la densidad del aire, $P_{a.seco}$ es la presión del aire seco, K_{as} 287,050 J/kg-°K es la constante de los gases para el aire seco, T_a es la temperatura del aire, $P_{vap.agua}$ es la presión del vapor de agua, K_{va} es la constante de los gases para el vapor de agua 461,495 J/kg-°K.

La presión del vapor se calcula como sigue:

$$e = e_s * HR$$

Donde e_s es la presión de vapor saturado y HR es la humedad relativa.

Para estimar la sublimación (cm eq.a.) en un periodo de tiempo se calcula un promedio del flujo de calor latente (W/cm^2) estimado y se multiplica por los segundos del periodo, luego se divide por el calor específico de sublimación del hielo 2.834 (J/g) y se multiplica por la densidad promedio de la capa superficial de nieve en g/cm^3 .

Para estimar la fusión (cm eq.a.) en un periodo de tiempo se calcula un promedio la energía total disponible (W/cm^2) estimada y se multiplica por los segundos del periodo, luego se divide por el calor específico de fusión del hielo 334 (J/g) y se multiplica por la densidad promedio de la capa superficial de nieve en g/cm^3 .

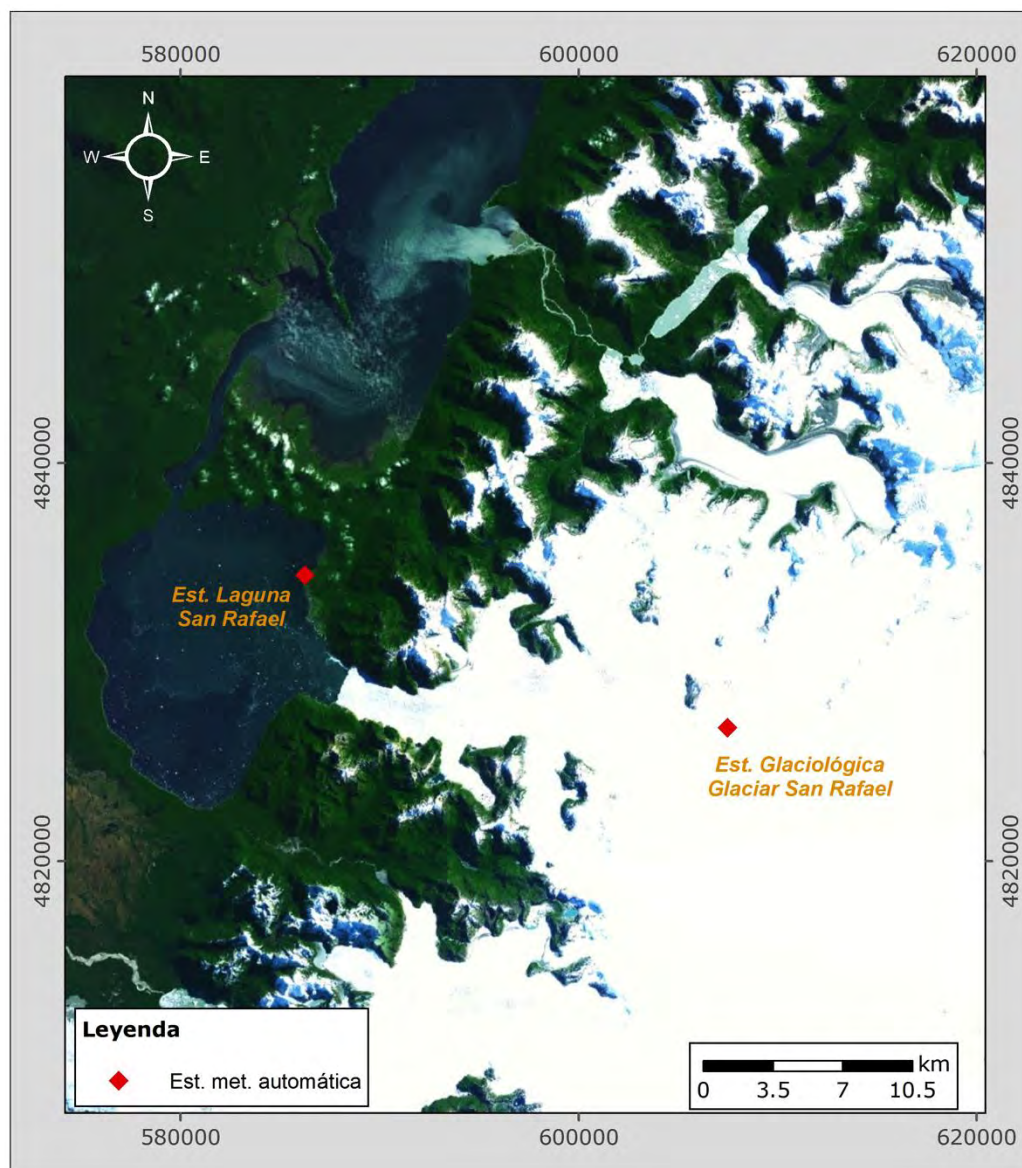


Figura 4.1-A. Ubicación de la estación meteorológica en la meseta del glaciar San Rafael, al costado del refugio EGGSR.



Figura 4.1-B. Estación meteorológica Campbell (2 m y 4 m) y Vaisala (4 m) en la meseta de glaciar San Rafael, aledaño a EGGSR. Torre con sensores de temperatura, humedad y viento. Agosto 2013.

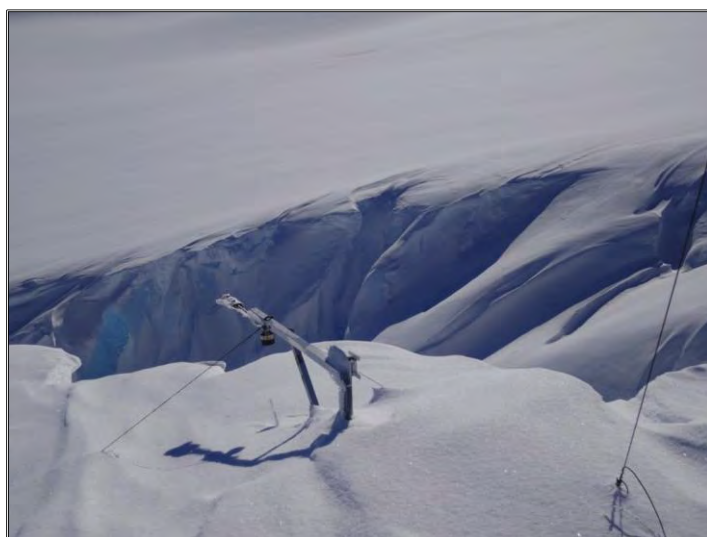


Figura 4.1-C. Marco con radiómetro y sensor de altura de nieve de la estación meteorológica en la meseta del glaciar San Rafael. Agosto 2013.

Es preciso recordar que la estación meteorológica está sobre un nunatak de roca y no sobre el glaciar. En agosto-septiembre de 2013, tal como lo muestran la Figs. 4.1-B y 4.1-C, la superficie de roca se encontraba cubierta por nieve, lo cual se mantiene probablemente durante el invierno. En cambio en verano y parte del otoño y la primavera es muy probable que la roca esté descubierta de nieve, por lo que los parámetros medidos pueden no representar las condiciones sobre la superficie del glaciar.

4.2. RESULTADOS METEOROLÓGICOS

La temperatura del aire registrada a 2 m durante todo el periodo de registro entre el 16 de agosto 2012 y el 4 de septiembre del 2014 varía entre $-15,2^{\circ}\text{C}$ y $17,0^{\circ}\text{C}$, con un promedio igual a $0,5^{\circ}\text{C}$. En la Fig. 4.2-A, B y C se presentan los datos promedios horarios de temperatura donde se observa que en verano las temperaturas son en general positivas y en invierno descienden por bajo de los 0°C .

Tabla 4.2-A. Datos de temperatura a 2 m utilizados.

Periodo	Sensor
16/08/2012-16/11/2012	Vaisala
16/11/2012-11/09/2013	Campbell
11/09/2013-09/11/2013	Vaisala
09/11/2013-04/09/2014	Campbell

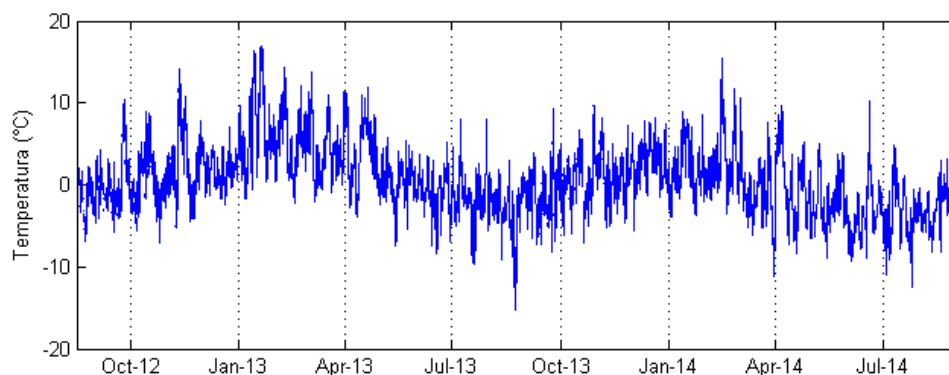


Figura 4.2-A. Temperatura del aire a 2 m, del 16 de agosto 2012 al 4 de septiembre 2014.

La humedad relativa a 2 m registrada tiene un promedio de 83% y varía entre 100% y 1%. En la Fig. 4.2-B se presentan los datos de humedad relativa promedio horario, donde se observa que el aire se encuentra muy cerca del 100% de humedad una gran parte del tiempo, sin embargo puede disminuir fuertemente en algunos periodos. No se observa estacionalidad en los valores de humedad relativa.

Tabla 4.2-B. Datos de humedad relativa a 2 m utilizados.

Periodo	Sensor
16/08/2012-16-11/2012	Vaisala
16/11/2012-11/09/2013	Campbell
11/09/2013-09/11/2013	Vaisala
09/11/2013-04/09/2014	Campbell

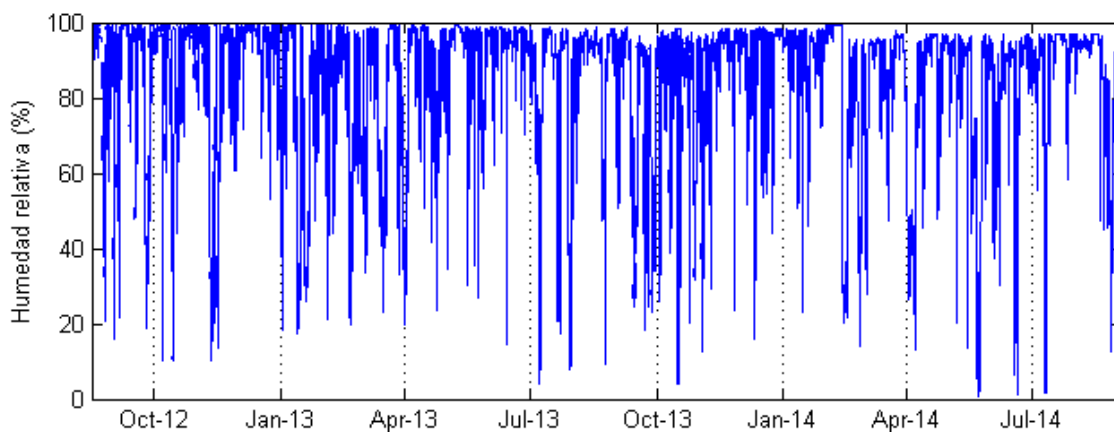


Figura 4.2-B. Humedad relativa a 2 m, del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.

La velocidad del viento medida a 2 m se ha registrado con los datos de la estación Vaisala, que cuenta con un mayor periodo de registro, y también con la estación Campbell (Tabla 4.2-C). La velocidad del viento Vaisala varía entre 0,0 m/s y 31,5 m/s, con un promedio igual a 5,8 m/s.

Tabla 4.2-C. Datos de viento a 2 m utilizados.

Periodo	Sensor
16/08/2012-16/11/2012	Vaisala
16/11/2012-11/05/2013	Campbell
11/05/2013-04/09/2014	Vaisala

El registro de datos Campbell de velocidad del viento a 2 m entre el 5 de mayo y el 9 de noviembre de 2013 ha sido descartado, ya que los datos presentan un comportamiento anómalo, con fluctuaciones en torno a 17 m/s. Durante el periodo del 16 de noviembre de 2012 al 11 de mayo de 2013 la estación Campbell cuenta con datos de viento a 2 m (Fig. 4.2-C). Para el periodo de registro, la velocidad del viento, tiene un promedio de 5,3 m/s a 2 m.

En la Fig. 4.2-C se observa que la velocidad del viento se mantiene generalmente bajo los 10 m/s en el verano entre noviembre y marzo, y luego aumenta la variabilidad, en invierno con valores mínimos de calma (cero viento) y valores máximos que en promedio son superiores a los de verano.

La velocidad promedio del viento en la estación Vaisala durante el verano (diciembre, enero y febrero 2013) es de 4,4 m/s, mientras que en invierno (junio, julio y agosto 2013) la velocidad promedio en la misma estación es de 6,9 m/s, vale decir un 57% mayor. Esto puede reflejar una activación del viento catabático durante los meses de invierno, en condiciones de menor radiación solar, y/o una mayor frecuencia de la actividad ciclónica invernal.

La dirección del viento es principalmente NE-E que corresponde al viento catabático que desciende desde el monte San Valentín hacia el frente del glaciar San Rafael, Figs. 4.2-D y E.

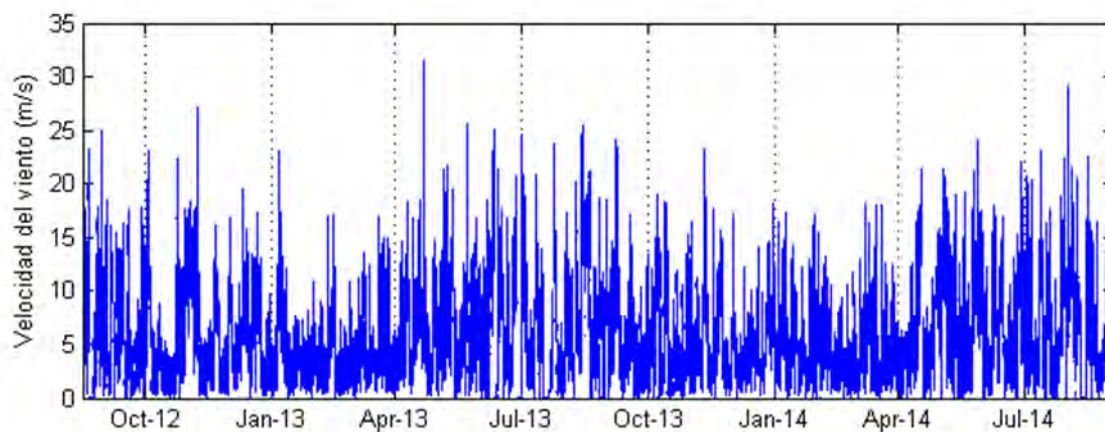
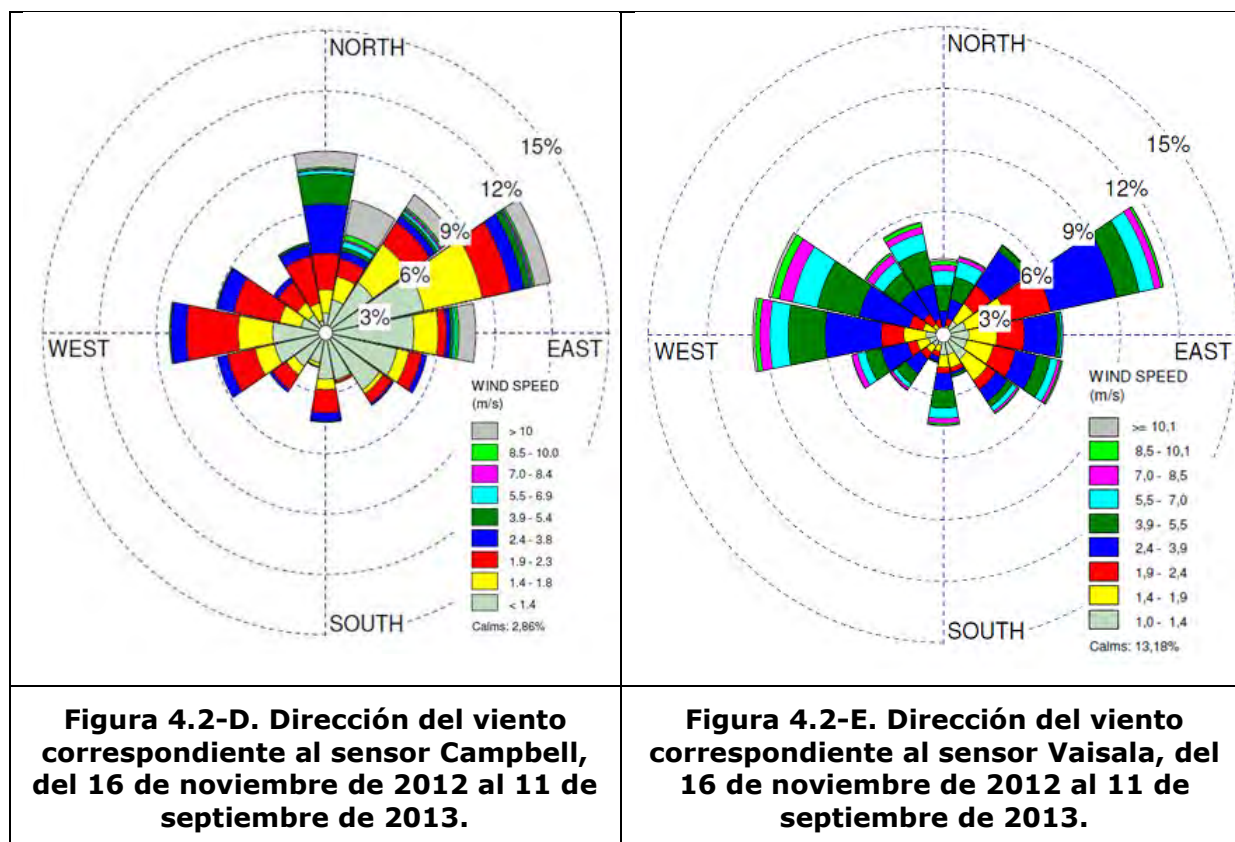


Figura 4.2-C. Velocidad del viento a 2 m, del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.



Solo se cuenta con datos de altura de nieve para el periodo del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013. Los valores de altura de nieve se calcularon como 300 cm menos la distancia a la superficie, medida por el sensor. Los datos de altura de nieve presentan problemas ya que no representan la ablación y acumulación de nieve en la zona, Fig. 4.2-F. El problema se debe probablemente a que la nieve se vuela con el viento sobre la superficie del nunatak durante la mayor parte del verano, dejando al descubierto la roca, y durante el invierno el sensor se encuentra posiblemente cubierto de nieve y no registra datos negativos por encontrarse fuera de rango. O bien el sensor podría estar defectuoso.

Tabla 4.2-D. Datos de altura de nieve.

Periodo	Sensor
16/11/2012-11/09/2013	Campbell

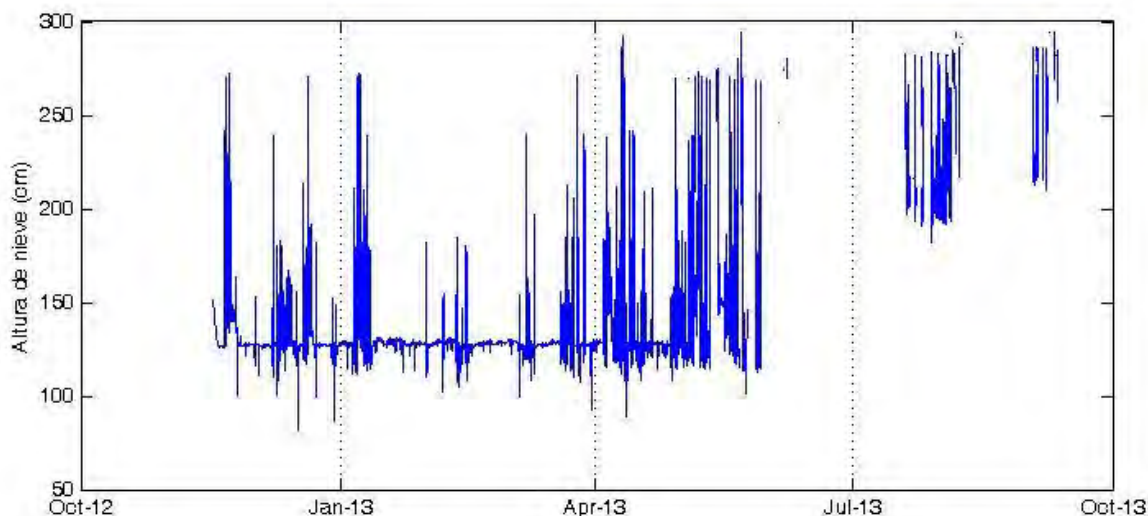


Figura 4.2-F. Altura de nieve, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.

Entre el 16 de agosto y el 4 de septiembre 2014, la radiación de onda corta neta varía entre 0 W/m² y 828 W/m² con un promedio de 159 W/m². En la Fig. 4.2-G se presentan los valores horarios de la radiación de onda corta neta, donde se observa la

estacionalidad de este parámetro con 274 W/m^2 promedio y 829 W/m^2 de máximo en verano (diciembre, enero y febrero) y 46 W/m^2 promedio y 301 W/m^2 de máximo en invierno (junio, julio y agosto).

Tabla 4.2-E. Datos de radiación de onda corta.

Periodo	Neta	Incidente y reflejada
16/08/2012-16/11/2012	Vaisala	-
16/11/2012-11/09/2013	Campbell	Campbell
11/09/2013-09/09/2013	Vaisala	-
09/11/2013-04/09/2014	Campbell	Campbell

En el periodo del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013, se tienen datos de radiación de onda corta incidente y reflejada. La radiación de onda corta incidente registrada es en promedio de 142 W/m^2 y la radiación de onda corta reflejada es en promedio de 56 W/m^2 .

En el periodo del 9 de noviembre 2013 al 4 de septiembre 2014, se tienen datos de radiación de onda corta incidente y reflejada. La radiación de onda corta incidente registrada es en promedio de 139 W/m^2 y la radiación de onda corta reflejada es en promedio de 54 W/m^2 .

La radiación de onda corta incidente presenta una estacionalidad muy marcada debido a la inclinación solar, presentando en verano un promedio de 233 W/m^2 y un máximo de 1100 W/m^2 , mientras que en invierno el promedio es 61 W/m^2 y un máximo de 730 W/m^2 .

Por otro lado, la radiación de onda corta reflejada presenta una estacionalidad débil debido al cambio del albedo y a la estacionalidad de la radiación de onda corta incidente, presentando en verano un promedio de 69 W/m^2 y un máximo de 544 W/m^2 , mientras que en invierno el promedio es 43 W/m^2 y un máximo de 490 W/m^2 .

En la Fig. 4.2-H y I se presentan los datos horarios de radiación de onda corta incidente y reflejada. Se observa que la radiación incidente tiene un ciclo normal con un máximo diario cercano a 1.100 W/m^2 en los solsticios de verano y un mínimo cercano a 200 W/m^2

en los solsticios de invierno.

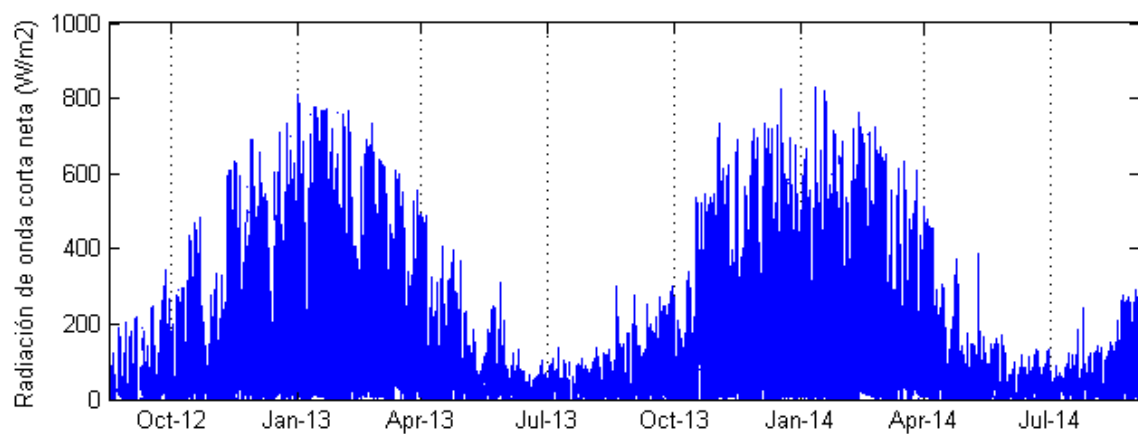


Figura 4.2-G. Radiación de onda corta neta, del 16 de agosto al 4 de septiembre de 2014.

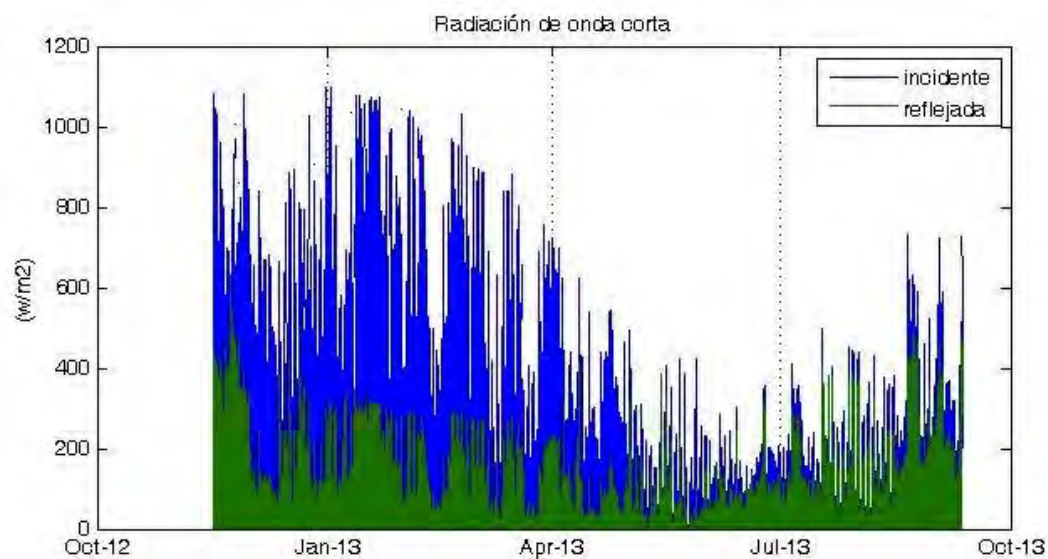


Figura 4.2-H. Radiación de onda corta incidente y reflejada, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.

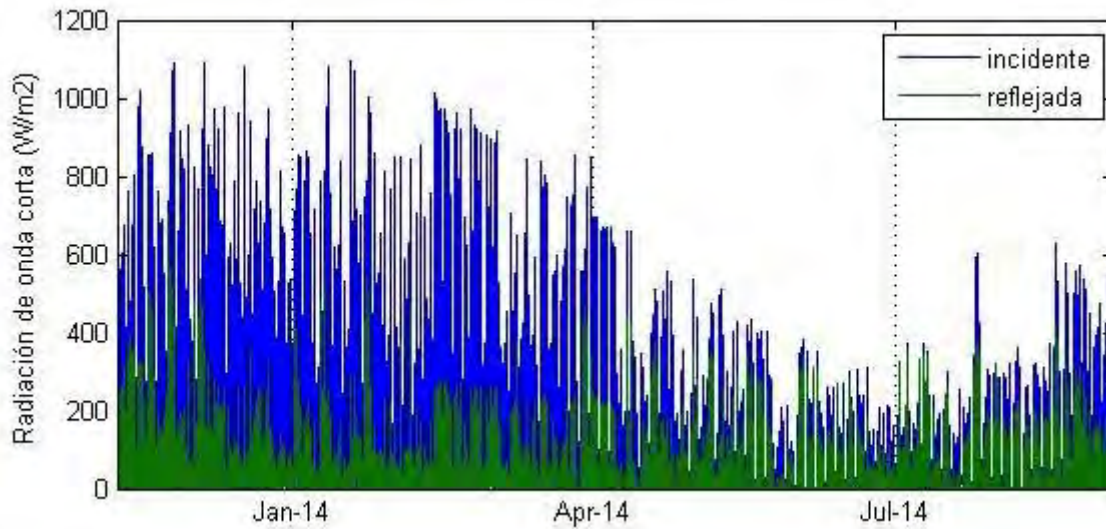


Figura 4.2-I. Radiación de onda corta incidente y reflejada, del 9 de noviembre 2012 al 4 de septiembre 2014.

En la Fig. 4.2-J se presentan los datos de albedo promedio día, del periodo del 16 de noviembre de 2012 al 3 de septiembre de 2014, donde se observa que en el verano el albedo es menor a 0,2 algunos días, probablemente debido a la presencia de la roca descubierta. En invierno 2013 los valores varían entre 0,5 y 0,95 que corresponde a valores en el rango de neviza y nieve fresca (Cuffey & Paterson, 2010). En el invierno 2014 los valores de albedo son menores debido a la menor acumulación ese año, sugiriendo que en algunas ocasiones la roca está descubierta.

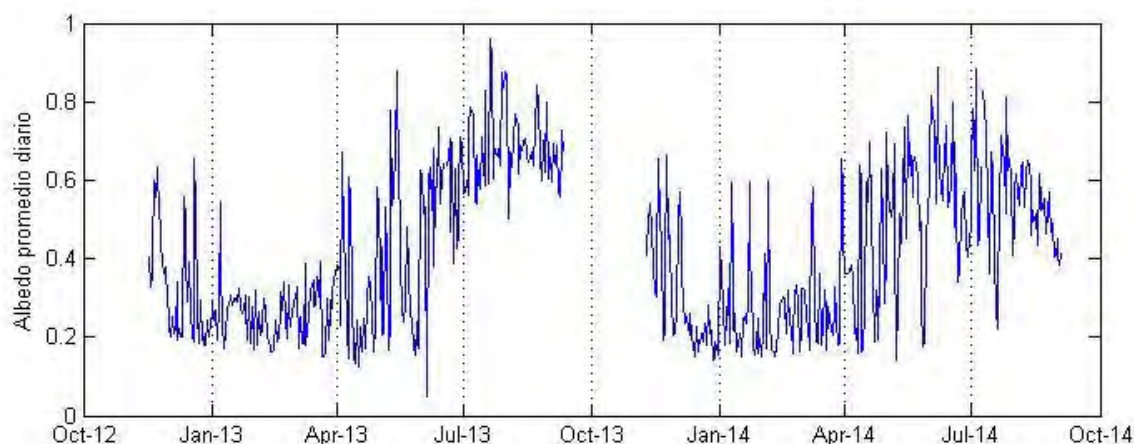


Figura 4.2-J. Albedo promedio diario, del 16 de noviembre de 2012 al 3 de septiembre de 2014.

Los menores valores de albedo del invierno 2014 respecto del invierno 2013 concuerdan con la menor presencia de nieve en EGGSR en invierno 2014 respecto del invierno 2013. En efecto, los refugios (cápsulas) estaban en invierno 2013 cubiertas casi en su totalidad por la nieve, mientras que en invierno 2014 estaban bastante descubiertas de nieve (Figs. 4.2-K y L).



Figura 4.2-K. Los dos refugios (cápsulas) de EGGSR cubiertas en gran medida por nieve en agosto 2013.



Figura 4.2-L. Los dos refugios (cápsulas) a la llegada a EGGSR en agosto 2014. Nótese que la cubierta de nieve es menor a la de agosto 2013.

En el periodo del 16 de agosto al 4 de septiembre de 2014 la radiación de onda larga neta (Tabla 4.2-F) presenta valores entre 0 W/m² y 100 W/m², con un promedio igual a 20 W/m². La superficie generalmente pierde energía debido a la emisión de radiación de onda larga (Fig. 4.2-M).

Tabla 4.2-F. Datos disponibles de radiación de onda larga.

Periodo	Neta	Incidente y emitida
16/08/2012-16-11/2012	Vaisala	-
16-08/2012-11/09/2013	Campbell	Campbell
12/09/2013-09/11/2013	Vaisala	-
09/11/2013-04/11/2014	Campbell	Campbell

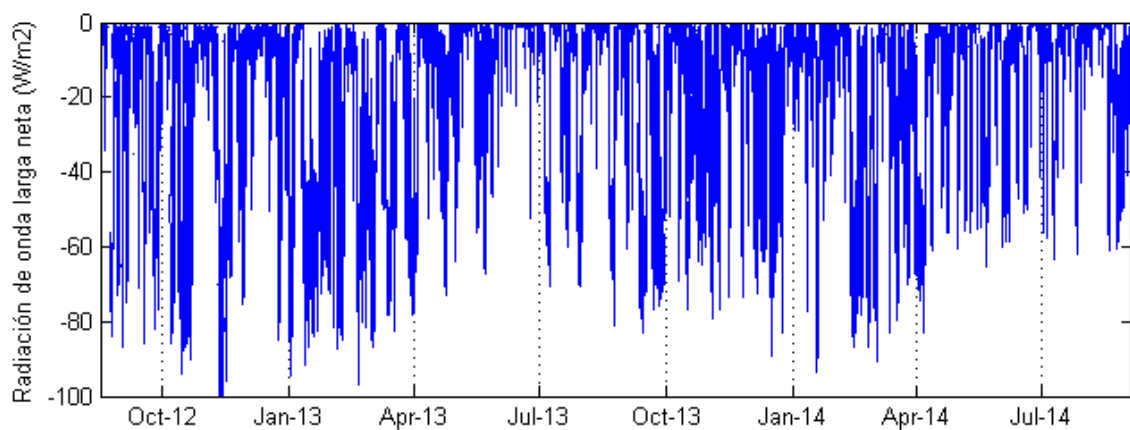


Figura 4.2-M. Radiación de onda larga neta, del 16 de agosto de 2012 al 4 de septiembre de 2014.

En el periodo del 16 de noviembre del 2012 al 11 de septiembre de 2013, la estación Campbell cuenta con datos de radiación de onda larga incidente y emitida. La Fig. 4.2-N presenta los datos promedios horarios de radiación de onda larga incidente y emitida. La radiación incidente tiene un promedio de 317 W/m^2 y la emitida tiene un promedio de 334 W/m^2 , por lo tanto la superficie pierde una energía promedio de onda larga de 17 W/m^2 en el periodo. Se observa que durante el invierno la radiación de onda larga incidente presenta valores mayores, debido a la mayor cobertura de nubes, mientras que en verano la radiación de onda larga incidente disminuye y presenta menor variación. Por otra parte, se observa que la radiación emitida es mayor en verano, como es de esperar debido a la mayor temperatura de la superficie.

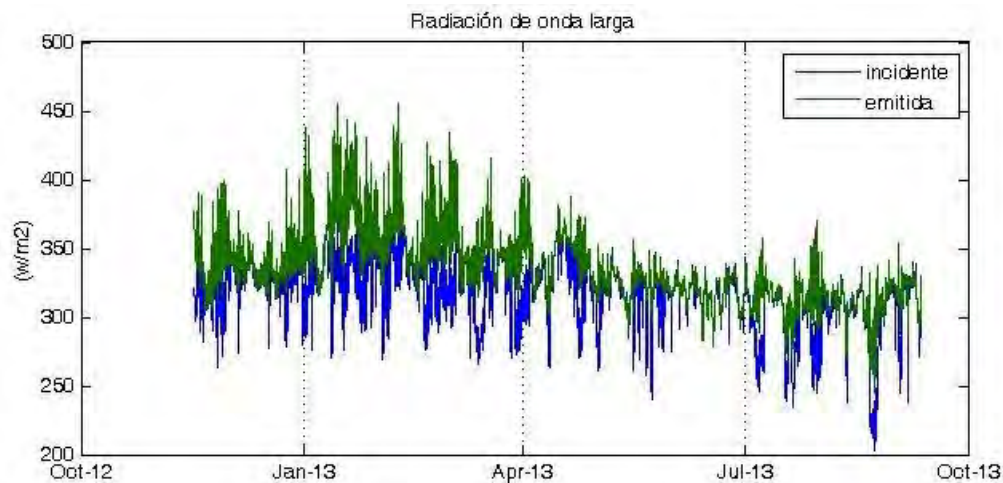


Figura 4.2-N. Radiación de onda larga incidente y emitida, del 16 de noviembre de 2012 al 11 de septiembre de 2013.

En el periodo del 9 de noviembre de 2013 al 4 de septiembre de 2014 la estación Campbell tiene datos de radiación de onda larga incidente y emitida. En la Fig. 4.2-O se presentan los datos promedios horarios de radiación de onda larga incidente y emitida. En este periodo la radiación de onda larga incidente tiene un promedio de 317 W/m^2 y la emitida tiene un promedio de 333 W/m^2 , la superficie pierde una energía promedio de 16 W/m^2 en el periodo. Al igual que para el periodo anterior se observa que la radiación de onda corta incidente es mayor en invierno, periodo en el cual también presenta mayor variación, debido principalmente a la mayor cobertura de nubes.

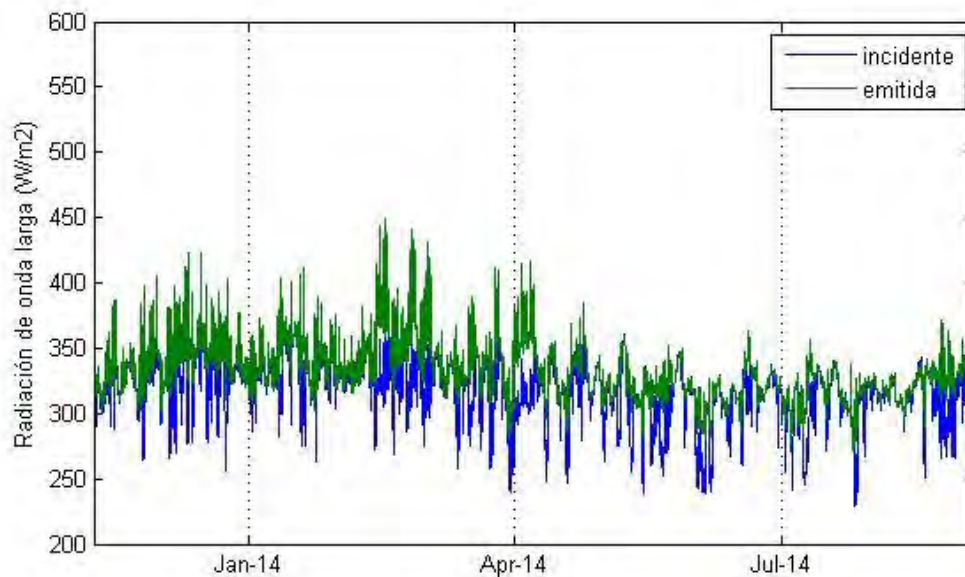


Figura 4.2-O. Radiación de onda larga incidente y emitida, del 9 de noviembre 2013 al 4 de septiembre 2014.

Se estimaron las precipitaciones en EGGSR basado en las precipitaciones de la Laguna San Rafael (LSR). Los datos de precipitaciones registrados en la estación LSR contienen un porcentaje de datos de solo un 56% del tiempo en el periodo de estudio (16 de noviembre 2012 al 4 de septiembre 2014), y por lo tanto se rellenaron utilizando los datos de la estación Río Aysén en Puerto Aysén ubicada 130 km al norte de la estación LSR. El relleno de los datos se realizó con un factor de precipitación de 1,72 estimado entre la precipitación acumulada en LSR respecto de Puerto Aysén en el periodo en que coinciden los registros, vale decir entre el 1 de enero de 2012 al 31 de agosto de 2014. En este periodo se cuenta con 16.039 datos horarios, donde se descartaron los datos de la estación LSR a partir del 22 de enero de 2014, debido a que los datos no nos parecían confiables pues no tenían decimales y todos los días indicaban valores entre 2 y 3 mm. Después del relleno de datos de precipitación en LSR, el registro se completó en un 97%.

Para estimar la precipitación en la meseta del glaciar San Rafael, en el punto de la estación EGGSR a 1200 m s.n.m. se utilizó el gradiente calculado por Fujiyoshi *et al.* 1987, quien realizó mediciones de las precipitaciones en el Glaciar San Rafael a distintas alturas entre octubre de 1985 y febrero de 1986. De la curva de tasa de precipitación

entre el nivel del mar y distintas alturas se obtiene que a 1200 m s.n.m. la tasa es de 2,5 respecto de LSR. Considerando, como se indicó antes, que en LSR precipita 1,72 veces más que en Puerto Aysén, entonces en EGSR existe una precipitación 4,3 veces mayor que en Puerto Aysén.

En la Fig. 4.2-P se presenta la precipitación horaria registrada en la estación LSR, los datos rellenados en la estación LSR y los datos estimados en la estación EGSR.

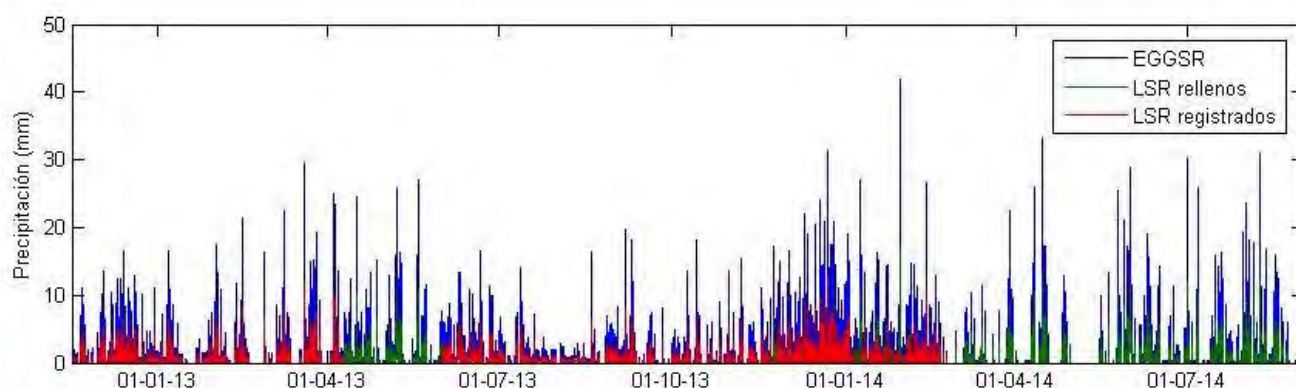


Figura 4.2-P. Precipitación registrada y rellenada en estación LSR y precipitación estimada en la estación EGSR.

En la Fig. 4.2-Q se presentan los datos de precipitación mensual en la estación EGSR, donde se observa que las precipitaciones ocurren durante todo el año, pero con una aparente distribución bimodal, con un máximo en diciembre y otro en otoño-invierno.

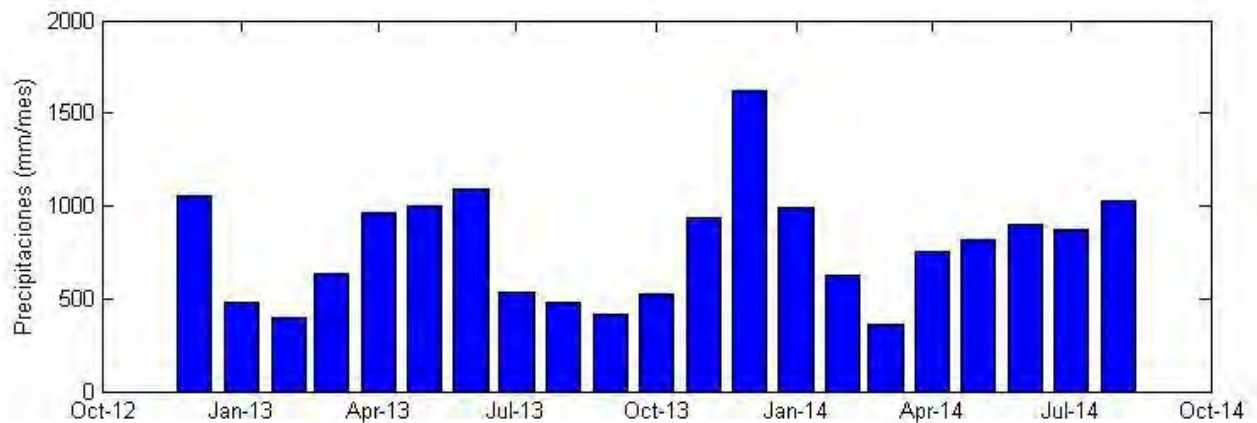


Figura 4.2-Q. Precipitación mensual en EGSR.

Las Figs. 4.2-R a 4.2-V muestran los parámetros meteorológicos a nivel mensual de las estaciones Vaisala y Campbell, ambas con sensores de temperatura de aire, humedad relativa, velocidad del viento, y radiación de onda corta y larga. Para determinar los promedios mensuales, se utilizó el registro de datos comprendido entre el periodo 16 de agosto del 2012 al 4 de septiembre del 2014. En primer lugar, se procedió a estimar los promedios diarios de cada parámetro. Luego, se identificaron los promedios diarios estimados con más de 20 datos horarios. Finalmente, los valores presentados corresponden a los promedios mensuales estimados con más de 20 días de registro.

Las Tablas 4.2-G a 4.2-P muestran (a) los promedios mensuales de los parámetros meteorológicos, y (b) el porcentaje de datos utilizado para su estimación (número de datos mensuales/total de horas del mes).

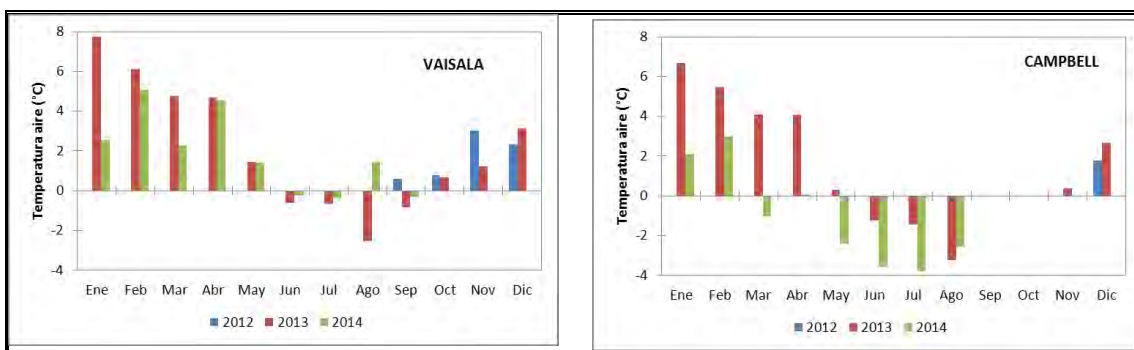


Figura 4.2-R. Temperatura del aire media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.

Tabla 4.2-G. (a) Temperatura del aire media mensual en °C. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									0,6	0,8	3,0	2,3
2013	7,7	6,1	4,8	4,7	1,5	-0,6	-0,7	-2,6	-0,9	0,7	1,2	3,1
2014	2,6	5,1	2,3	4,5	1,4	-0,2	-0,4	1,4	-0,3			
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									76%	90%	93%	96%
2013	97%	100%	100%	100%	76%	71%	80%	75%	90%	93%	96%	89%
2014	99%	100%	96%	83%	83%	83%	90%	72%				

Tabla 4.2-H. (a) Temperatura del aire media mensual en °C. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												1,8
2013	6,7	5,4	4,1	4,1	0,3	-1,2	-1,4	-3,2			0,4	2,6
2014	2,1	3,0	-1,0	0,1	-2,4	-3,6	-3,8	-2,6				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												100%
2013	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%			70%	100%
2014	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%				

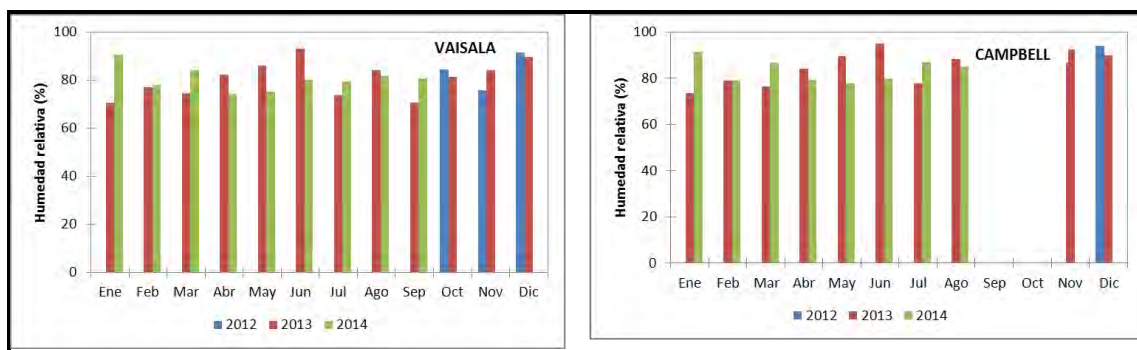


Figura 4.2-S. Humedad relativa media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.

Tabla 4.2-I. (a) Humedad relativa media mensual en %. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012										84,4	75,7	91,5
2013	70,6	77,1	74,5	82,1	85,8	92,9	73,5	84,1	70,6	81,2	84,2	89,6
2014	90,4	78,1	84,0	74,3	75,2	80,1	79,4	82,1	80,6			
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012										69%	73%	77%
2013	97%	100%	100%	100%	76%	71%	80%	72%	90%	93%	96%	89%
2014	99%	100%	96%	83%	83%	83%	90%	72%				

Tabla 4.2-J. (a) Humedad relativa media mensual en %. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												93,9
2013	73,5	79,0	76,5	83,9	89,6	94,8	77,5	88,3			92,2	89,8
2014	91,3	78,9	86,7	79,1	77,5	80,0	87,0	85,0				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												100%
2013	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%			70%	100%
2014	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%				

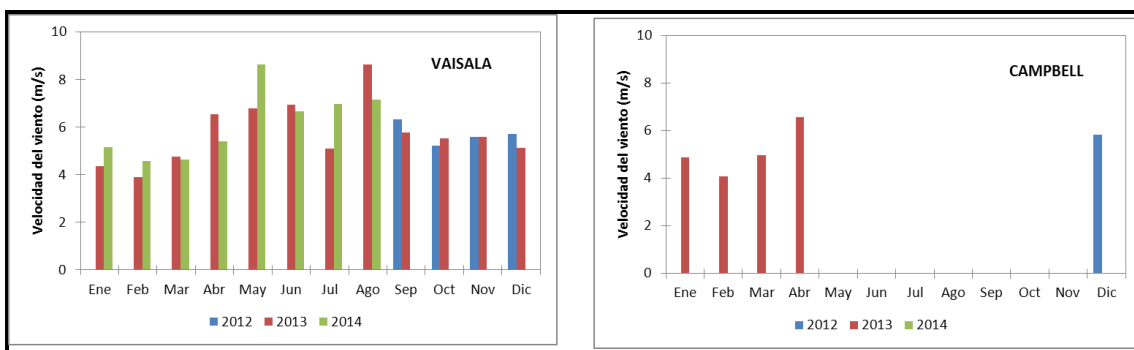


Figura 4.2-T. Velocidad del viento media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.

Tabla 4.2-K. (a) Velocidad del viento media mensual en m/s. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									6,3	5,2	5,6	5,7
2013	4,3	3,9	4,8	6,5	6,8	6,9	5,1	8,6	5,8	5,5	5,6	5,1
2014	5,2	4,6	4,6	5,4	8,6	6,7	7,0	7,1				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									76%	90%	93%	96%
2013	97%	100%	100%	100%	79%	71%	80%	75%	90%	93%	96%	89%
2014	99%	100%	96%	83%	83%	83%	90%	72%				

Tabla 4.2-L. (a) Velocidad del viento media mensual en m/s. (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												5,8
2013	4,9	4,1	5,0	6,6								
2014												
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												100%
2013	100%	100%	100%	100%								
2014												

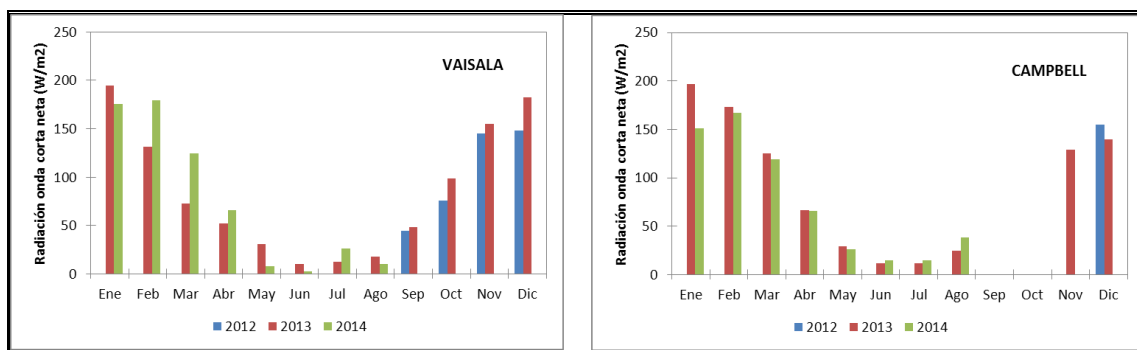


Figura 4.2-U. Radiación de onda corta neta media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.

Tabla 4.2-M. (a) Radiación de onda corta neta media mensual en W/m^2 . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									44,2	75,5	145,2	148,1
2013	194,8	131,3	72,6	51,8	30,4	9,9	12,1	17,6	47,9	98,2	154,9	182,5
2014	175,4	179,0	124,5	65,7	7,8	2,6	26,3	10,1				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									72%	78%	89%	96%
2013	90%	100%	100%	100%	73%	71%	80%	63%	90%	93%	96%	85%
2014	99%	99%	96%	83%	83%	79%	89%	63%				

Tabla 4.2-N. (a) Radiación de onda corta neta media mensual en W/m^2 . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												155
2013	197	173	125	67	29	12	11	24			129	140
2014	151	167	119	66	26	15	14	38				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												100%
2013	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%			70%	100%
2014	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%				

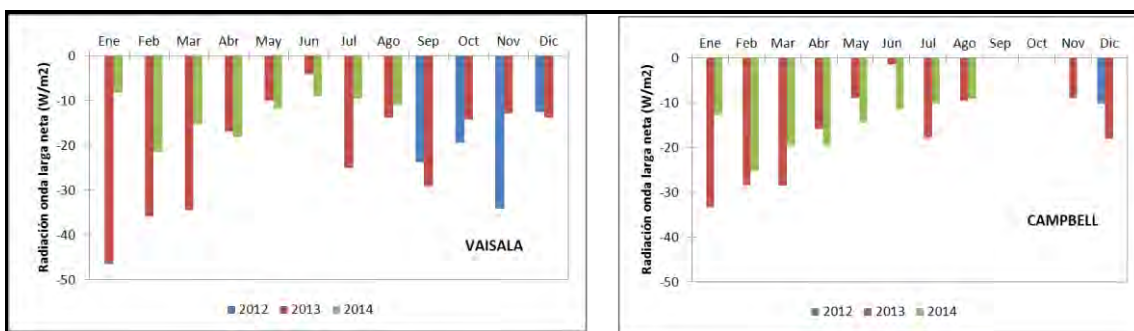


Figura 4.2-V. Radiación de onda larga neta media mensual, periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014.

Tabla 4.2-O. (a) Radiación de onda larga neta media mensual en W/m^2 . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Vaisala.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									-23,7	-19,3	-34,0	-12,5
2013	-46,5	-35,8	-34,4	-16,9	-10,0	-4,1	-25,1	-13,7	-29,1	-14,2	-12,9	-13,7
2014	-8,1	-21,4	-15,1	-18,2	-11,8	-8,9	-9,6	-10,9				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012									76%	90%	93%	96%
2013	97%	100%	100%	100%	76%	71%	80%	72%	90%	93%	96%	89%
2014	99%	100%	96%	80%	83%	83%	90%	72%				

Tabla 4.2-P. (a) Radiación de onda larga neta media mensual en W/m^2 . (b) Porcentaje de datos horarios utilizados. Periodo 16 de agosto de 2012 al 04 de septiembre de 2014, estación Campbell.

(a)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												-10
2013	-33	-28	-28	-16	-9	-1	-18	-10			-9	-18
2014	-13	-25	-19	-20	-14	-11	-10	-9				
(b)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2012												100%
2013	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%			70%	100%
2014	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%				

4.3. RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA

En la Tabla 4.3-A y Fig. 4.3-A se presentan los resultados promedio mensuales de los flujos de energía y en la Fig. 4.3-B se presentan los flujos de energía promedio horarios, en el periodo de estudio entre el 16 de agosto 2012 y el 4 de septiembre 2014. Se observa que la principal entrada de energía es la radiación de onda corta (R_{Snet}) que corresponde a un 98% del promedio de entrada total de energía en el periodo, el calor sensible aporta solo un 2% de la energía total entrante. La principal salida es la radiación de onda larga (R_{Lnet}) que corresponde a un 13% de la energía de salida y luego el calor latente (Q_L) que corresponde a un 11%. La energía disponible para la fusión (Q_M) es el 76% restante.

Los valores de radiación de onda corta neta son altos en relación a la relativamente alta latitud ($46,7^\circ S$) y condiciones de frecuente nubosidad. Esto se debe principalmente a que no existe relieve importante que limite las horas de sol y al bajo albedo de la superficie en el nunatak que provoca baja reflexión de la radiación de onda corta.

Los valores de radiación de onda larga neta son relativamente bajos como pérdida en comparación a otras zonas donde la mayor salida de energía es la radiación de onda larga. Los valores más bajos son en invierno (mes de junio 2013, promedio de $2,6 \text{ W/m}^2$).

La radiación de onda larga incidente y emitida en julio y agosto es muy similar a los valores reportados en el estudio del CECs de 2012 (DGA, 2012), que en julio y agosto presenta valores de radiación de onda larga incidente y emitida muy similares y en torno a los 300 W/m^2 (Figuras V.27 y V.28). Estos valores bajos de radiación de onda larga neta se relacionan a días nublados (Oerlemans, 2010).

El flujo de calor sensible es la segunda entrada de energía en comparación a la radiación de onda corta con un rango entre 7-37% entre invierno y verano, respectivamente, por lo que en verano es una fuente importante de energía para la ablación.

A pesar de que la humedad relativa es alta (promedio 83%), la diferencia entre la presión de vapor (promedio 533 hPa) y la presión de vapor saturado (promedio 662 hPa) es pequeña pero no despreciable, por lo que el flujo de calor latente tiene cierta

relevancia, mostrando que la sublimación utiliza una parte no despreciable de la energía disponible para la ablación, entre un 3% y 100%, con un promedio igual a 35%, con los valores mas altos en invierno, donde algunos meses llega al 100% cuando no hay energía para la fusión. Los flujos de calor latente promedios mensuales en verano entre diciembre y febrero (entre 9 W/m² y 41 W/m² el 2013 y entre 9 W/m² y 23 W/m² el 2014) son cercanos aunque algo menores a los calculado por Ohata et al. (1985) en diciembre 1983, igual a 40 W/m².

En los meses de julio y agosto los flujos estimados son similares a los estimados el año 2012 en la misma zona en el estudio DGA (2012), con valores de radiación de onda larga incidente y emitida cercanos a 300 W/m², radiación de onda corta incidente entre 0 W/m² y 800 W/m² y flujos turbulentos promedios entre 0 W/m² a -50 W/m².

La energía disponible para la fusión (Q_M) es máxima en enero y positiva durante 10 o 9 meses del año. Solo los meses de invierno (mayo, junio, julio y agosto) Q_M es cero o negativa, indicando que estos meses no hay fusión y la superficie se está enfriando o calentando al utilizar la energía liberada a partir del congelamiento de la fase líquida o sublimación regresiva de la fase gaseosa.

Tabla 4.3-A Flujos promedio mensuales de energía.

Periodo	R_{Snet} (W/m ²)	R_{Lnet} (W/m ²)	Q_s (W/m ²)	Q_L (W/m ²)	Q_M (W/m ²)
ago-12*	38,0	-17,7	-5,1	-16,7	-1,5
sep-12	67,2	-23,7	5,6	-23,2	25,8
oct-12	96,5	-21,8	-3,8	-7,5	63,5
nov-12	193,0	-27,2	13,2	-19,7	159,3
dic-12	239,8	-10,6	19,7	-8,6	240,4
ene-13	314,6	-35,4	46,4	-40,8	284,8
feb-13	291,2	-28,5	33,8	-20,2	276,3
mar-13	235,5	-29,4	31,6	-24,5	213,2
abr-13	135,0	-17,6	49,5	-25,6	141,3
may-13	67,6	-11,7	11,9	-12,3	55,6
jun-13	29,2	-2,6	-0,8	-6,6	19,2
jul-13	37,7	-20,7	-9,1	-14,0	-6,2
ago-13	55,8	-11,3	-40,4	-9,1	-4,9
sep-13	95,0	-31,6	-7,6	-19,6	36,3
oct-13	128,1	-20,8	9,0	-18,7	97,6
nov-13	230,6	-15,2	4,7	-13,2	206,9
dic-13	256,5	-18,5	21,8	-9,7	250,1
ene-14	260,5	-13,3	25,2	-9,3	263,0
feb-14	288,5	-25,9	21,8	-23,4	261,0
mar-14	219,6	-20,8	-10,4	-8,8	179,7
abr-14	135,5	-22,9	0,5	-22,2	90,9
may-14	64,2	-17,6	-27,2	-23,7	-4,2
jun-14	40,6	-15,2	-36,9	-16,0	-27,4
jul-14	45,5	-13,2	-35,1	-11,9	-14,7
ago-14	82,0	-11,2	-25,3	-13,9	31,5
Promedio	145,9	-19,4	3,7	-16,8	113,5

*El promedio de agosto 2012 corresponde al promedio entre el 16 y 31 de agosto 2012.

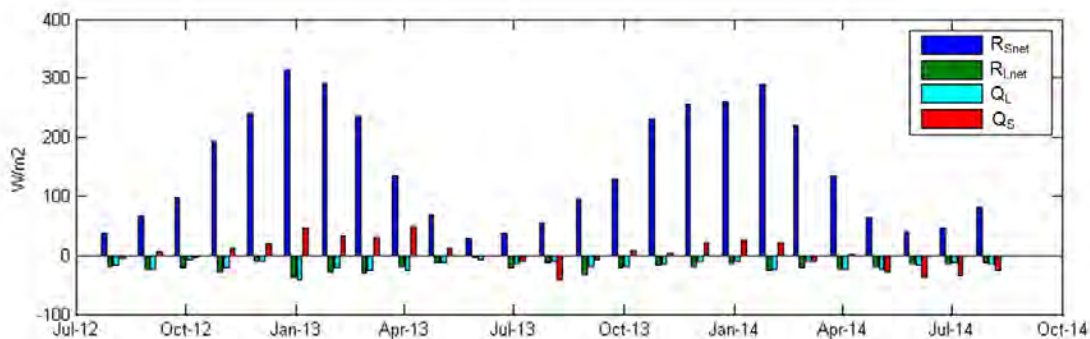


Figura 4.3-A. Flujos promedio mensuales de energía.

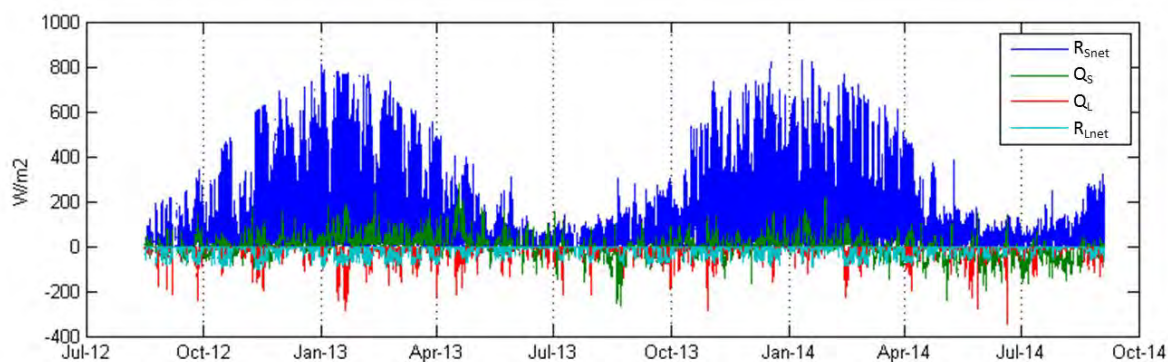


Figura 4.3-B. Flujos promedio horarios de energía.

La densidad superficial de la capa de nieve se estimó igual a $0,4 \text{ gr/cm}^3$ que corresponde al promedio de la densidad superficial (primeros 22,5 cm) de los datos medidos en el perfil de densidad realizado en el punto de la Torre San Rafael en agosto 2013 ($0,30 \text{ g/cm}^3$) y agosto 2014 ($0,44 \text{ g/cm}^3$).

En la Tabla 4.3-B se presenta la sublimación y fusión y ablación promedio día estimada para cada mes y la ablación total en el periodo en cm de eq.a., en el periodo del 16 de agosto 2012 a 31 agosto 2014. Se observa que la sublimación es muy pequeña en comparación a la fusión debida a que la energía necesaria para sublimar es mucho mayor a la necesaria para la fusión. La ablación más importante ocurre en los meses de primavera-verano, con un promedio de 2,4 cm eq.a./día entre noviembre y marzo. Sin embargo a principios de otoño la ablación sigue siendo importante, con un promedio de 1,2 cm eq.a./día en abril.

En total en los 2 años completos (septiembre 2012 a agosto 2014) la ablación calculada en EGGSR es igual a 23,0 m neviza (9,2 m eq.a.) lo que da un promedio igual a 11,5 m de neviza por año (4,6 m eq.a.).

La ablación estimada de 3,0 y 2,6 cm eq.a./día en diciembre 2012 y 2013 respectivamente, es mayor a la estimada por Ohata *et al.* (1985), de 1,5 cm eq. a./ día en diciembre 1983 a 1200 m s.n.m. La variación se puede deber a la variabilidad de las condiciones meteorológicas entre diciembre 1983 y diciembre 2012 y 2013 y/o a calentamiento en el periodo de 30 años.

Schaefer *et al.* (2013) estima una ablación promedio cercana a 3 m eq. a. al año en la zona de la estación EGGSR, menor a la estimada en el presente estudio. La diferencia puede ser atribuible a la diferencia de datos meteorológicos y la metodología utilizada.

Tabla 4.3-B. Sublimación, fusión y ablación estimada.

Fecha	Ablación			Ablación
	Sublimación	Fusión	Ablación	Total
	cm eq.a./día	cm eq.a./día	cm eq.a./día	cm eq.a./periodo
ago-12*	0,02	0,00	0,02	0,63
sep-12	0,03	0,27	0,30	8,85
oct-12	0,01	0,66	0,67	20,64
nov-12	0,02	1,65	1,67	50,18
dic-12	0,01	2,49	2,50	77,43
ene-13	0,05	2,95	3,00	92,90
feb-13	0,02	2,86	2,88	80,73
mar-13	0,03	2,21	2,24	69,31
abr-13	0,03	1,46	1,49	44,79
may-13	0,01	0,58	0,59	18,29
jun-13	0,01	0,20	0,21	6,20
jul-13	0,02	0,00	0,02	0,53
ago-13	0,01	0,00	0,01	0,34
sep-13	0,02	0,38	0,40	12,00
oct-13	0,02	1,01	1,03	32,02
nov-13	0,02	2,14	2,16	64,70
dic-13	0,01	2,59	2,60	80,60
ene-14	0,01	2,72	2,73	84,72
feb-14	0,03	2,70	2,73	76,42
mar-14	0,01	1,86	1,87	57,96
abr-14	0,03	0,94	0,97	29,04
may-14	0,03	0,00	0,03	0,90
jun-14	0,02	0,00	0,02	0,59
jul-14	0,01	0,00	0,01	0,45
ago-14	0,02	0,33	0,34	10,64
Promedio	0,02	1,20	1,22	
Total				920,87

*La ablación en agosto 2012 corresponde al promedio entre el 16 y 31 de agosto y la ablación total corresponde a la multiplicación del promedio por los 31 días del mes.

No existen medidas de ablación en la superficie del glaciar en el punto de la estación que permitan validar el datos del balance ya que la estación EGGSR se encuentra instalada sobre un nunatak. Sin embargo, en el periodo de ablación de 2013-2014 se compararon

los valores de ablación con el balance de energía y la ablación medida en la Torre San Rafael que se encuentra a una altura similar pero 5 km al sur-oeste de la estación sobre la meseta del glaciar San Rafael.

El periodo de ablación comparado es entre el 1 octubre 2013 y el 31 de abril 2014. En este periodo, según el balance de energía, ocurrió una ablación igual a 642,9 cm de neviza y la ablación medida en la Torre 1 (San Rafael) es igual a 630,4 cm de neviza. Valores muy similares si se toma en cuenta que no corresponden exactamente al mismo punto. En la Fig. 4.3-C se presenta la ablación estimada en el balance de energía y la ablación medida en la Torre 1 en el periodo antes señalado. Se observa que ambas curvas son muy similares, por lo que se considera que el balance de energía estimado es capaz de representar de forma adecuada el intercambio de energía en la estación EGGSR.

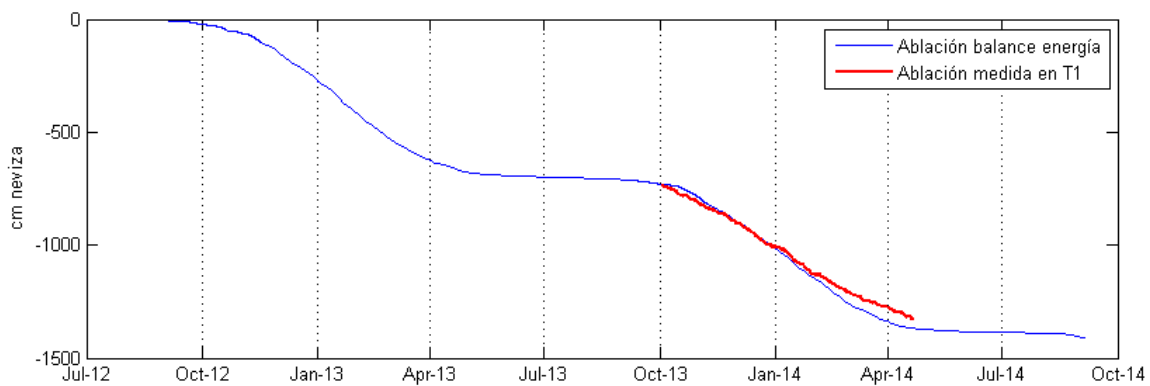


Figura 4.3-C. Ablación horaria estimada con el balance de energía y medida en la Torre San Rafael (T1).

5. TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL EN LA MESETA

5.1. METODOLOGÍA CAMPAÑAS 2013 Y 2014

Para determinar la topografía superficial, se realizó durante las campañas a la meseta de CHPN un levantamiento DGPS (GPS diferencial) en modo cinemático con equipos de doble frecuencia, que proporcionan en modo cinemático una precisión vertical y horizontal mejor que 20 cm y 10 cm, respectivamente.

El equipo utilizado en 2013 fue un GNSS (Global Navigation Satellite System) Trimble R6, de propiedad de la DGA. Se utilizó un nuevo punto de referencia en roca, CHPN2, a pocos metros de la estación meteorológica automática, aproximadamente 100 m al norte del PR CHN instalado por la DGA en una campaña previa (el que estaba situado a un costado de la estación EGGSR (Estación Glaciológica Glaciar San Rafael)), según se muestra en la Fig. 5.1-A. Se instaló este nuevo punto dado que no se pudo encontrar el punto PR CHN debido a la cubierta de nieve invernal. Se realizaron asimismo 9 mediciones DGPS en modo estático cada 5 km a lo largo del mismo perfil longitudinal A-A', marcados mediante balizas de Conduit (PVC naranja) de 16 mm x 3 m, entre el kilómetro 0 y el kilómetro 40. El procesamiento de las posiciones de las balizas se efectuó con el software Trimble Business Center v3.01, con una medición de unos 10 minutos por baliza, procesado diferencialmente con los datos de la base CHPN2, con una línea base máxima de 40 km.



Figura 5.1-A. Estación base CHPN2, campaña 2013.

Para determinar la topografía superficial durante la campaña a CHPN de agosto de 2014, se realizó un levantamiento GPS diferencial cinemático a lo largo del perfil longitudinal y el control GPS estático a 9 balizas instaladas cada 5 km a lo largo del este perfil. Los equipos utilizados fueron dos receptores GNSS Topcon Hiper SR. Las mediciones diferenciales se realizaron utilizando como base la estación implementada durante la campaña de 2013 (estación base CHPN2, Fig. 5.1-B) y las mismas coordenadas de 2013 procesadas con Trimble Business Center. El postproceso de los datos obtenidos en terreno se realizó con el software Magnet Tools v2.7 de Topcon.

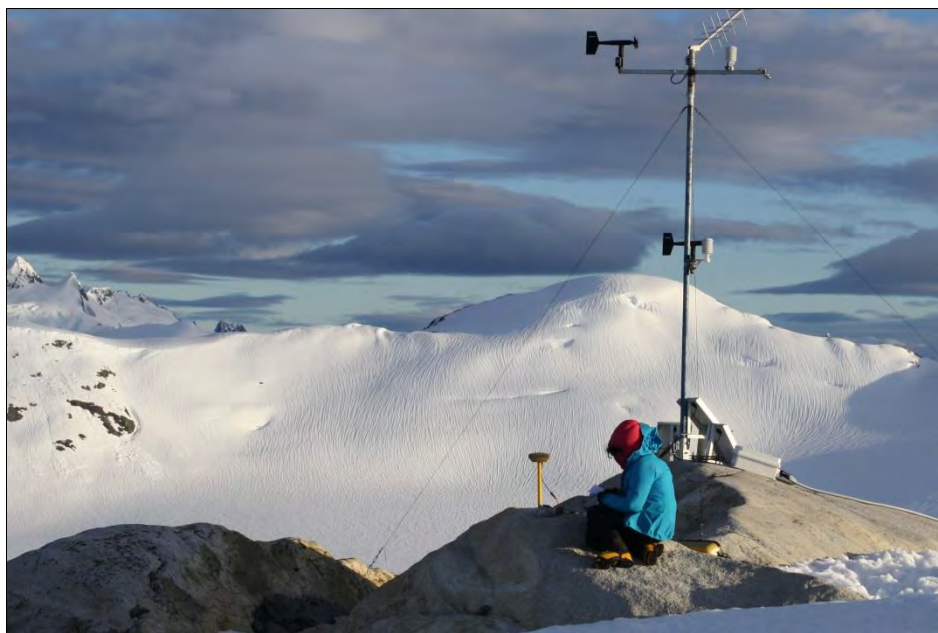


Figura 5.1-B. Estación base CHPN2, agosto 2014.

5.2. RESULTADOS

5.2.1. Campaña 2013 a la meseta de CHPN

Los resultados del procesamiento de la base CHPN2 se muestran en la Tabla 5.2.1-A. Los resultados de las posiciones de las balizas (en total 10 balizas) se muestran en la Tabla 5.2.1-B. La baliza 1A corresponde a la posición de antigua baliza 1 del 2012 y la baliza 1B corresponde a la primera baliza de 2013, donde comienzan las mediciones del radar GPR.

Tabla 5.2.1-A. Coordenadas del punto de referencia CHPN2. La altitud (altura ortométrica) se calculó mediante el modelo geoidal EGM96. El procesamiento de las posiciones de las balizas se efectuó con tres distintos software: Trimble Business Center v3.01; procesamiento DGPS en línea disponible en www.ngs.noaa.gov/OPUS; y Precise Point Positioning (PPP) disponible en <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php> (Natural Resources Canada). La precisión nominal de los procesamientos DGPS OPUS y PPP NRC es del orden de 1 cm en las coordenadas horizontales y 2 cm en la vertical.

Año	Coordenadas UTM WGS84 Huso 18				Coordenadas geográficas		
	Software	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m s.n.m.)	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altura elips. WGS84 (m)
2013	DGPS TBC	4.826.696,18	607.491,16	1196,90	46°42'16,7372"	73°35'37,8247"	1216,40
2014	DGPS OPUS	4.826.696,27	607.491,53	1197,18	46°42'16,7340"	73°35'37,8071"	1216,68
2013	DGPS OPUS	4.826.696,26	607.491,54	1197,22	46°42'16,7342"	73°35'37,8070"	1216,72
2013	PPP NRC	4.826.696,26	607.491,53	1197,21	46°42'16,7344"	73°35'37,8071"	1216,71
2014	PPP NRC	4.826.696,27	607.491,53	1197,34	46°42'16,7339"	73°35'37,8070"	1216,84

Para el punto CHPN2 el post proceso de los datos obtenidos en terreno mediante el software Trimble Business Center v3.01 (en Tabla 5.2.1-A) se realizó un procesamiento diferencial con la estación de referencia PARC de Punta Arenas, (<http://igscb.jpl.nasa.gov/network/site/parc.html>), con una serie de datos simultánea de 9,5 horas para el archivo con la ocupación más larga de la Campaña de agosto a septiembre de 2013. Las coordenadas de CHPN2 procesadas con Trimble Business Center v3.01 se utilizaron para determinar las coordenadas de las balizas (levantamiento estático) y la topografía superficial y datos GPR (levantamiento cinemático).

A modo de comprobación de las coordenadas de CHPN se realizó un procesamiento DGPS (GPS Diferencial) y un procesamiento PPP (Precise Point Positioning). Para el procesamiento con el servicio DGPS OPUS (Online Positioning User Service) de NOAA (b), se utilizaron 3 soluciones de líneas base independientes: Punta Arenas, Falklands y Concepción basado en una serie de datos para CHPN2 de 10,25 horas para el 24 agosto 2014 y 9,5 horas para el 3 de septiembre de 2013 (Anexo 6). Se observa que la diferencia en distancia horizontal de ambas soluciones (Trimble TBC y NOAA OPUS) es de 38 cm, mientras que en altura la diferencia es de 28 cm. El procesamiento PPP de NRC (Anexo 6) se efectuó con los mismos datos de 2013 y 2014 del procesamiento OPUS de

NOAA. Es notable el buen ajuste entre las soluciones NOAA OPUS y PPP NRC, del orden de 1 cm en las coordenadas horizontales, aunque aumenta a 12 cm en la coordenada vertical.

Las Figs. 5.2.1-A, B y C ilustran las mediciones 2013 de las balizas mediante GPS estático por un periodo de 10 minutos. Para el cómputo de las posiciones estáticas de las balizas y las posiciones cinemáticas de las posiciones GPS se utilizaron las coordenadas obtenidas mediante la solución del software Trimble Business Center v3.01 (en Tabla 5.2.1-A).



Figura 5.2.1-A. GPS diferencial estático baliza 6. Agosto 2013.

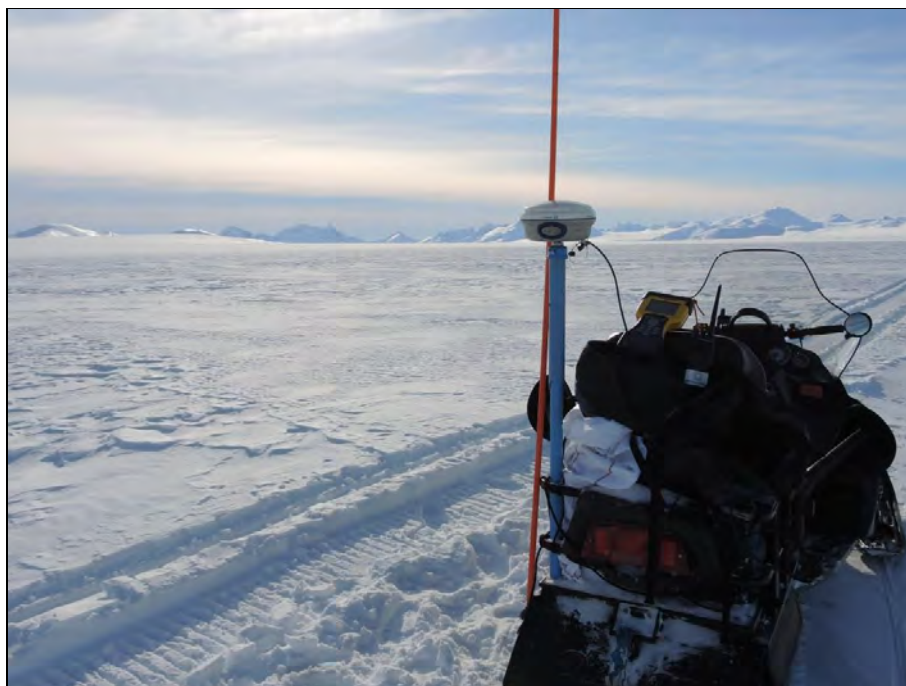


Figura 5.2.1-B. GPS diferencial estático baliza 4. Agosto 2013.



Figura 5.2.1-C. GPS diferencial estático baliza 3. Agosto 2013.

Tabla 5.2.1-B. Coordenadas 2013 de las balizas calculadas mediante GPS diferencial utilizando la base CHPN2. La altitud (altura ortométrica) corresponde a la base de las balizas (superficie del glaciar) y se calculó mediante el modelo geoidal EGM96. La altura elipsoidal corresponde al sistema WGS84. La precisión nominal es mejor que 2 cm en la horizontal y 3 cm en la vertical. La ubicación de las balizas se puede apreciar en la Fig. 5.2.1-D.

Baliza	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Altitud (m s.n.m.)	Altura elipsoidal (m)
1A	607.546,34	4.826.617,04	1198,05	1217,55
1B	607.859,64	4.826.399,86	1189,73	1209,25
2	609.311,10	4.821.874,23	1158,18	1177,82
3	609.936,87	4.817.217,76	1227,09	1246,83
4	610.613,45	4.812.328,29	1220,08	1239,93
5	611.357,61	4.807.499,26	1246,51	1266,46
6	612.678,96	4.802.513,66	1329,84	1349,91
7	613.422,58	4.797.440,32	1410,87	1431,03
8	613.997,18	4.792.755,01	1483,82	1504,06
9	614.641,54	4.787.014,78	1527,54	1547,88

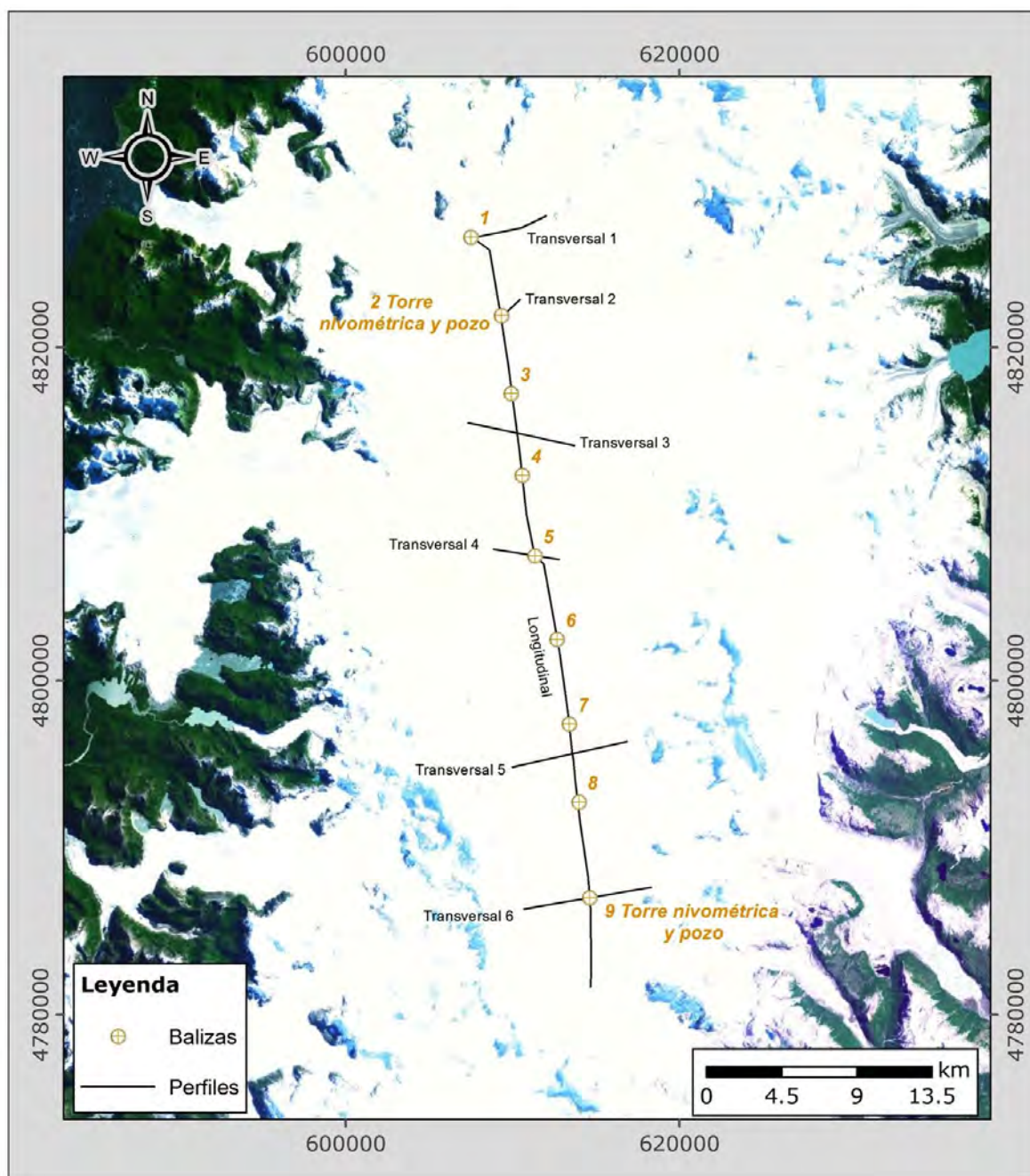


Figura 5.2.1-D. Mapa indicando las balizas descritas en el texto. La torre nivométrica en el sur corresponde al glaciar Colonia, y en el norte al glaciar San Rafael. Las posiciones de las balizas 1A de 2013 y de la baliza 1 de 2014 coinciden. La distancia entre las posiciones de las balizas 1A y 1B de 2013 es de 381 m, que coinciden gráficamente con el círculo que marca la posición de la baliza 1 a la escala de la figura.

5.2.2. **Campaña 2013 a la meseta de CHPN**

Las coordenadas resultantes de los levantamientos estáticos realizados a las nueve balizas (Fig. 5.2.2-A) ubicadas lo largo del perfil longitudinal se muestran en la Tabla 5.2.2-A.



Figura 5.2.2-A. Medición con GPS estático de la baliza 7, agosto 2014.

Tabla 5.2.2-A. Coordenadas 2014 de las balizas calculadas mediante GPS diferencial utilizando la base CHPN2. La altitud (altura ortométrica) corresponde a la base de las balizas (superficie del glaciar) y se calculó mediante el modelo geoidal EGM96. La altura elipsoidal corresponde al sistema WGS84. La precisión nominal es mejor que 2 cm en la horizontal y 3 cm en la vertical. La ubicación de las balizas se puede apreciar en la Fig. 6.2.1-E.

Baliza	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Altitud EGM96 (m s.n.m.)	Altura elipsoidal (m)
1	607.539,16	4.826.606,52	1196,27	1215,76
2	609.305,98	4.821.875,47	1156,74	1176,38
3	609.936,03	4.817.232,96	1225,22	1244,95
4	610.621,06	4.812.323,51	1218,83	1238,66
5	611.359,79	4.807.491,60	1246,68	1266,62
6	612.674,33	4.802.513,02	1328,51	1348,57
7	613.419,89	4.797.433,02	1408,74	1428,89
8	613.991,90	4.792.746,73	1483,27	1503,51
9	614.640,33	4.787.015,07	1526,66	1546,99

6. RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE

La metodología del radar de penetración terrestre (en inglés GPR: Ground Penetrating Radar), también llamada Radio Echo Sounding (RES) en estudios de espesores de glaciares, se basa en la emisión de una señal electromagnética generada por un transmisor, que se propaga a través de las capas superiores de un glaciar, y que es reflejada debido a cambios en las propiedades dieléctricas de la nieve, la neviza y el hielo, y luego es capturada por una antena receptora y un receptor. El GPR es una técnica ampliamente utilizada para el estudio de los glaciares debido a su alta precisión en la determinación de espesores (mejor que un 5% por lo general) y facilidades logísticas (Bogorodsky *et al.*, 1985; Daniels, 2004).

Las propiedades dieléctricas de la nieve, la neviza y el hielo están determinadas por diferentes características físico-químicas como la densidad, la geometría de los cristales, la conductividad y la composición de iones y micropartículas (Kovacs *et al.*, 1995; Daniels, 2004), que a su vez influyen en la permitividad dieléctrica (ϵ), que constituye el parámetro eléctrico básico.

La naturaleza temperada de la nieve, neviza o hielo es relevante para el GPR puesto que condiciona la presencia o ausencia de agua de fusión. En efecto, el agua inhibe la penetración de las ondas electromagnéticas de radar en el hielo debido a la mayor absorción y dispersión de las ondas electromagnéticas, por la presencia de agua intersticial y cuerpos de agua intraglacial que normalmente existen en el interior de los glaciares temperados, tal como aquellos del CHPN (Bogorodsky *et al.*, 1985; Plewes and Hubbard, 2001; Nobes, 2011). Cabe mencionar el ϵ del hielo frío es aproximadamente 3,2, mientras que para el agua es 80 (Nobes, 2011), por lo cual la energía de la onda electromagnética es fuertemente absorbida y asimismo la velocidad de propagación de la onda electromagnética en agua es notablemente menor que en hielo, particularmente en lo que respecta al hielo frío.

6.1. METODOLOGÍA

Se utilizó un GPR GSSI SIR-3000, provisto de una antena de 200 MHz, propiedad de la DGA, que permite penetrar la totalidad del manto nival, cuyo espesor máximo en la zona

se estima en 20 m, basado en una precipitación de 10 m de equivalente en agua sobre la meseta del CHPN (Escobar *et al.*, 1992) y una densidad media de $0,5 \text{ g/cm}^3$. Experiencias previas de testigos de nieve y neviza en la zona indican que a principios de diciembre, a cota 1500 m en el glaciar Nef, la densidad de la capa de nieve invernal para 1996 era de $0,55 \text{ g/cm}^3$ y un espesor de 6 m, con un equivalente en agua (eq.a.) anual de 3,4 m (Matsuoka & Naruse, 1999). En forma similar, una perforación realizada en diciembre de 1986 a cota 1300 m en el glaciar Rafael, indica una acumulación invernal de 3,5 m eq.a. para 1985 y una densidad promedio de $0,53 \text{ g/cm}^3$ (Yamada, 1987).

Los parámetros programados en la unidad de control SIR-3000 utilizados en CHPN se muestran en la Tabla 6.1-A. La frecuencia de repetición de pulsos y la ganancia de la antena son características propias del equipo, sin posibilidad de cambio. Se prefirió no utilizar un GPS conectado directamente al GPR pues se utilizó un receptor GNSS de doble frecuencia independiente en modo diferencial. Para georeferenciación se calibró el tiempo interno de la unidad de control con el tiempo del receptor GNSS, y además se realizaron marcas en el registro de radar mediante la unidad de control cada 5 km aproximadamente, en puntos que se midieron mediante GNSS en método estático, marcados mediante balizas. El número de muestras se fija a 1024, la resolución de los datos en 16 bits y la tasa de captura de datos en 32 trazas/s pues es adecuado para una buena representación de los datos a capturar en CHPN con una antena de 200 MHz, pues un mayor valor de trazas/s disminuye en forma relevante la capacidad de memoria de la unidad de control y en ocasiones también resulta en su funcionamiento irregular (se puede “colgar” o “congelar” la unidad de control). Por otra parte un número menor de número de muestras, una menor resolución de los datos y una mayor tasa de captura de datos disminuye en forma importante la calidad de los datos. El rango de tiempo se fija en 500 ns pues ello permite una penetración potencial de unos 50 m en neviza, suficiente para penetrar un par de años con las mayores acumulaciones anuales esperadas (de unos 20 m/año, Schaefer *et al.*, 2013). La permitividad dieléctrica (ϵ) se fijó en un valor estimado de 2,25 basado en la relación $\epsilon = (1 + 0.845\rho)^2$ (Kovacs, 1995) y utilizando un valor promedio de la densidad ρ de nieve de $0,59 \text{ g/cm}^3$ (Yamada, 1987; Matsuoka & Naruse, 1999) para una capa superficial del glaciar de unos 30 m en la meseta del CHPN. A partir del valor calculado de 2,25 para la permitividad dieléctrica ϵ resulta una velocidad de propagación de la onda de 20 cm/ns basado en la relación $v = c/\sqrt{\epsilon}$, donde c es la velocidad de propagación en la onda electromagnética en el vacío (30 cm/ns). Se eligieron 5 factores de ganancia manual que permitieron una buena visualización de los

datos en la pantalla de la unidad de control. Una adecuada posición de la señal gatillador (trigger) se logra con un corrimiento (offset) de -20 ns y una superficie a 0%. Los filtros de paso bajo y paso alto de respuesta de impulso infinita (infinite impulse response) no se usan (valor cero) pues tienden a cambiar la fase de la señal original. Los filtros de paso bajo y de paso alto de respuesta de impulso finita (finite impulse response) se fijaron en 300 y 80 MHz, adecuado para una frecuencia central nominal de 200 MHz en aire.

Tabla 6.1-A. Parámetros programados para mediciones del manto nival en CHPN en la unidad de control SIR-3000. A una velocidad nominal del mototobogán de 20 km/h (5,6 m/s) resulta en una tasa de captura de 178 trazas/m.

RADAR	200 MHz		
	T_RATE	Frecuencia de repetición de pulsos	100 kHz
	MODE	Dominio del tiempo	Time
	GPS	Sin conexión directa a GPS	None
SCAN	SAMPLES	Número de muestras por cada traza	1024
	FORMAT	Resolución de los datos	16 bits
	RANGE	Rango de tiempo	500 ns
	DIEL	Constante dieléctrica estimada de la nieve	2,25
	RATE	Tasa de captura de trazas por unidad de distancia en el caso de usar un odómetro	No aplica
	SCN/UNIT	Tasa de captura de trazas	32 trazas/s
	GAIN	Ganancia de antena	0 dB
GAIN	MANUAL	Modo de ganancia manual	
	POINTS	Número de puntos de la función de ganancia	5 dB
	GP1	Ganancia del primer punto	-10 dB
	GP2	Ganancia del segundo punto	32 dB
	GP3	Ganancia del tercer punto	39 dB
	GP4	Ganancia del cuarto punto	44 dB
	GP5	Ganancia del quinto punto	57 dB
POSITION	MANUAL	Modo de posición del trigger	
	OFFSET	Pre-trigger	-20 ns
	SURFACE		0%

FILTERS	LP_IIR	Filtro pasa bajo infinite impulse response	0
	HP_IIR	Filtro pasa alto infinite impulse response	0
	LP_FIR	Filtro pasa bajo finite impulse response	300 MHz
	HP_FIRR	Filtro pasa alto finite impulse response	80 MHz
	STACKING	Número de promedios	0
	BGR_RMV	Background removal	0

Las mediciones GPR deben realizarse en conjunto con mediciones GPS, de tal manera que posteriormente (en post-proceso), se puedan combinar y asignar coordenadas a las trazas GPR obtenidas desde el comienzo hasta el final del tramo de medición respectivo.

El radar para hielo es transportado sobre un trineo de madera con base de fibra de vidrio confeccionado para este fin, con el mínimo de elementos metálicos, el cual es impulsado por una moto de nieve (Figs. 6.1-A y 6.1-B). Para efectos de seguridad de movilización en terrenos con grietas, cada vez que se transita en un terreno del CHPN por primera vez, se transita con dos motos, una moto adelante a unos 60 m, y otra atrás con el trineo y el radar, ambas atadas firmemente sus respectivas carrocerías mediante una cuerda de 20 mm, según un método adaptado del British Antarctic Survey (BAS, 2013). Luego que se ha transitado la ruta, y marcado eventuales zonas con grietas, se puede proceder a transitar con las motos desencordadas.



Figura 6.1-A. Medición mediante GPR y DGPS cinemático. Agosto 2013.



Figura 6.1-B. Medición mediante GPR y DGPS cinemático. Agosto 2013.

Las etapas del procesamiento y análisis de datos de radar son las siguientes:

- a) Georeferenciación de las trazas de radar a partir del procesamiento DGPS.
- b) Importación de los datos de radar al software Reflexw (Sandmeier, 2004).
- c) Unión de archivos GPS con los archivos de radar correspondientes a cada perfil del glaciar, ya sean transversales o longitudinales, importándolos a Reflexw.
- d) Interpolación equidistante de las trazas, que dependerá de la velocidad de la moto de nieve (estimada en 10-30 km/h).
- e) Filtrar los datos para una mejor visualización: pasa banda, control de ganancia, ajuste del tiempo cero (superficie), acoplamiento.
- g) Identificación de la capa de nieve invernal y posibles estratos intermedios, y subyacentes, vectorización y obtención de espesores. La vectorización se realizó manualmente, identificando el reflector prominente interpretado como el nivel freático (en todos los perfiles) y la capa nival anual (en dos perfiles). Para ello se seleccionó el primer peak positivo.
- h) Traspaso de datos de radar a formato ASCII.
- i) Importación de los datos a Microsoft Excel para su ploteo.

6.2. RESULTADOS GPR 2013

A continuación se muestran los resultados de 19 archivos GPR longitudinales, (Tabla 6.2-A y Figs. 6.2-A a S), donde el eje de las abscisas tiene el origen en el km 0, 300 m al sureste del refugio EGGSR, en la baliza 1B (ver su ubicación Tabla 6.2.1-B), donde se iniciaron las mediciones GPR (Fig. 6.2-A).

Se muestran los 6 perfiles transversales (Tabla 6.2-A y Figs. 6.2-A, 6.2-T a Z), donde el origen de la distancia corresponde al extremo occidental de cada perfil. En todos los perfiles longitudinales y transversales, salvo el perfil longitudinal L003, se interpreta el reflector prominente más profundo, que es claramente identificable en forma muy continua a lo largo de los perfiles. Debido a su profundidad, que varía entre 9 m y 42 m (Fig. 6.2-Z), se interpreta que corresponde al nivel freático descrito por Yamada (1987). De hecho, en el lugar del perfil GPR más cercano al sitio de perforación de Yamada (1987), ubicado 1.100 m al este del perfil L002 (Fig. 6.2-Z) este reflector se ubica a una profundidad de 17.2 m, similar a la profundidad de 24.9 m detectada por Yamada (1987)

para el nivel freático. Si efectivamente se trata del nivel freático, representaría entonces 4 años de acumulación de nieve según Yamada (1987), por lo cual un cálculo preliminar de acumulación anual promedio en 4 años correspondería al 25% de la profundidad del nivel freático, vale decir entre 2,3 y 10,5 m/año. Asumiendo una densidad promedio cercana a $0,6 \text{ g/cm}^3$ para la capa de neviza y nieve sobre el nivel freático (Yamada, 1987) esto resultaría en acumulaciones anuales de 1,4 m y 6,3 m eq.a. (equivalente en agua) para la zona.

Entre el reflector que se asume es el nivel freático y la superficie aparecen varios reflectores, pero no es posible correlacionarlos con acumulación anual o multi-anual. En los perfiles L002 y L003 se ha interpretado un reflector más somero, que muestra reflectores relativamente paralelos por sobre este nivel, y reflectores donde se pierde el paralelismo en profundidad (Figs. 6.2-C y D). No es posible dilucidar la edad de este reflector más somero, que exhibe profundidades que varían entre 6 y 17 m (Fig. 6.2-AA).

Tabla 6.2-A. Características de los perfiles de radar adquiridos en la campaña de agosto de 2013. En paréntesis los nombres de los archivos originales usados para elaborar los perfiles transversales. Las dos columnas de la derecha corresponden al rango de las profundidades de la napa freática en cada perfil.

Nombre del perfil	Tipo de perfil	Distancia (m)	Nº de trazas	Prof. mínima	Prof. máxima
L001	Longitudinal	316,1	9.490	10,26	28,35
L002	Longitudinal	1.594,8	32.767	13,75	21,23
L003	Longitudinal	2.067,6	32.767	9,59	23,44
L004	Longitudinal	756,4	15.935	14,99	20,18
L005	Longitudinal	3.821,5	32.767	17,00	28,40
L006	Longitudinal	2.848,2	32.767	24,90	29,98
L007	Longitudinal	3.115,2	32.767	23,03	29,89
L008	Longitudinal	4.158,8	32.767	18,20	29,26
L009	Longitudinal	1.208,2	32.767	24,89	29,85
L010	Longitudinal	3.350,0	32.767	21,49	34,93
L011	Longitudinal	2.992,6	32.767	32,49	39,23
L012	Longitudinal	1.576,6	13.184	30,88	37,98
L013	Longitudinal	2.398,9	28.652	32,90	41,30
L015	Longitudinal	2.827,3	32.767	29,84	38,87
L016	Longitudinal	3.515,5	32.767	31,20	40,15
L017	Longitudinal	3.402,9	32.767	32,33	40,04
L018	Longitudinal	3.970,1	32.767	21,32	37,70
L019	Longitudinal	877,4	15.976	18,52	27,35
T1 (T004+T005)	Transversal	4.519,8	45.817	9,19	22,08
T2 (T001)	Transversal	1.740,7	16.142	15,77	24,08
T3 (T002)	Transversal	5.908,8	32.767	23,29	30,23
T4 (T006)	Transversal	3.920,3	32.767	18,49	33,39
T5 (T008+T009)	Transversal	5.488,7	42.707	28,51	41,00
T6 (T011)	Transversal	5.775,0	32.767	32,02	42,74

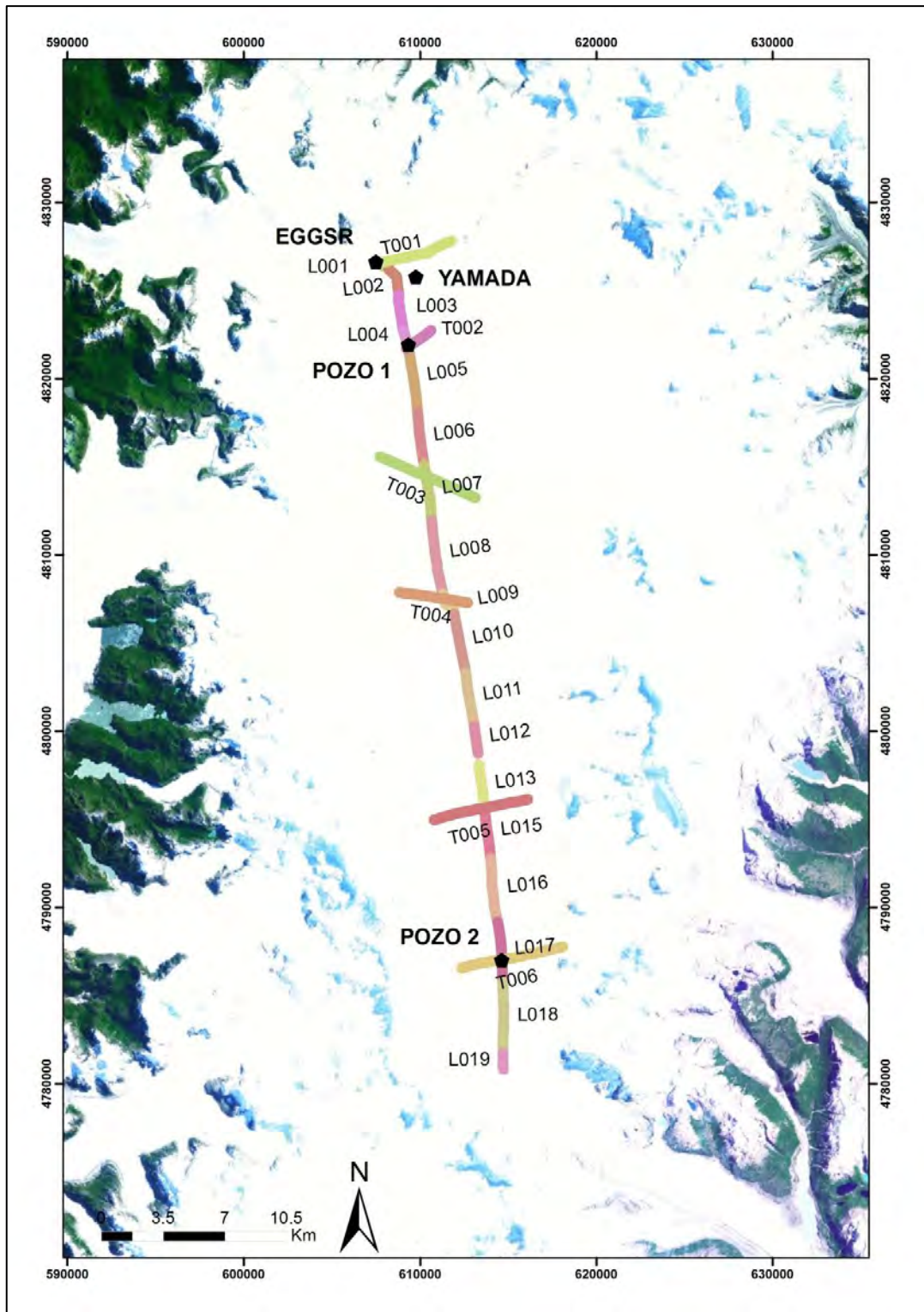


Figura 6.2-A. Perfiles GPR de 2013 longitudinales y transversales correspondientes a las Figs. 6.2-B a 6.2-Y. "Yamada" representa la posición de la perforación realizada por Yamada (1987).

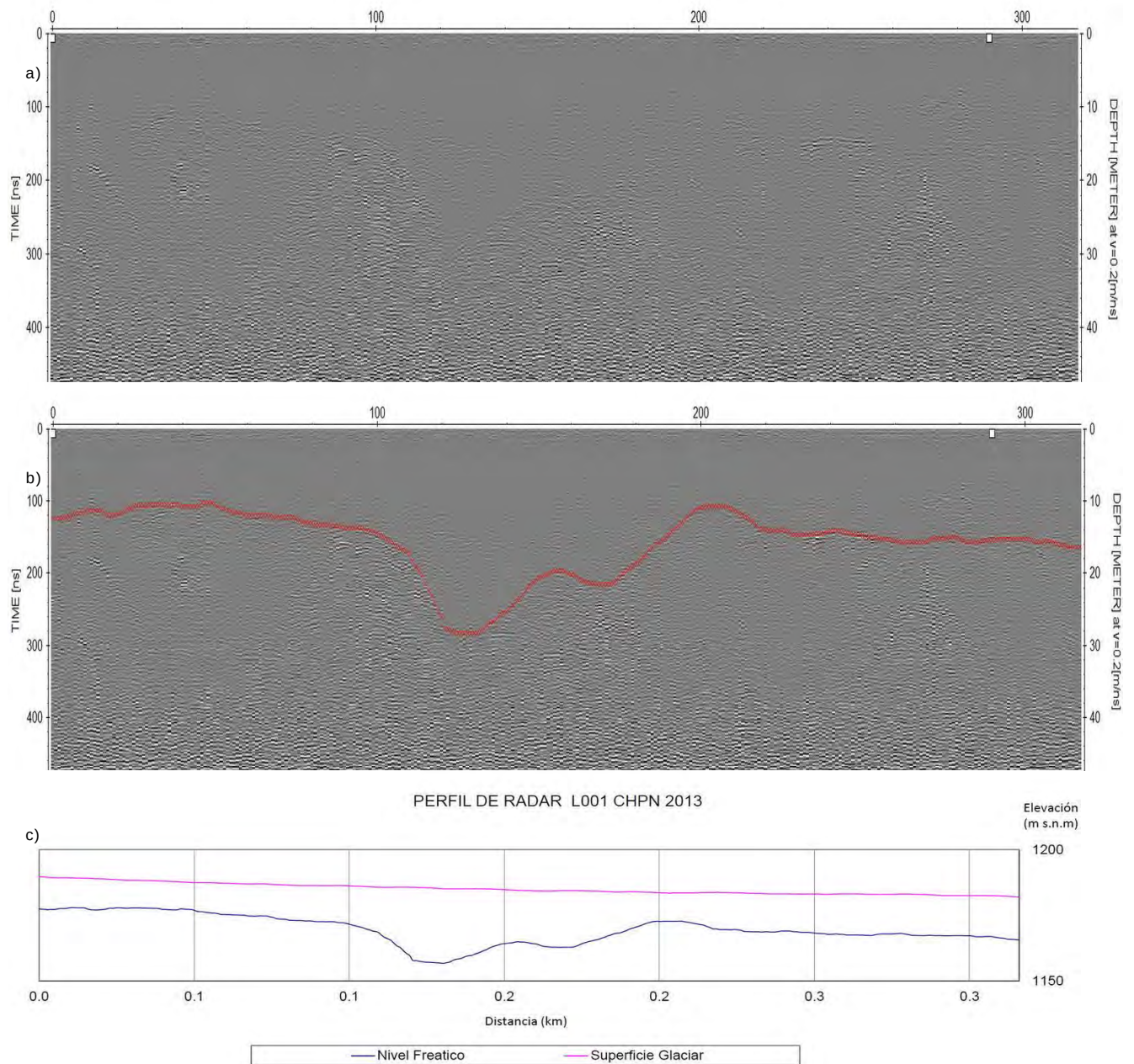


Figura 6.2-B. Perfil longitudinal L001. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001, 380 m al sureste del refugio EGGSR.

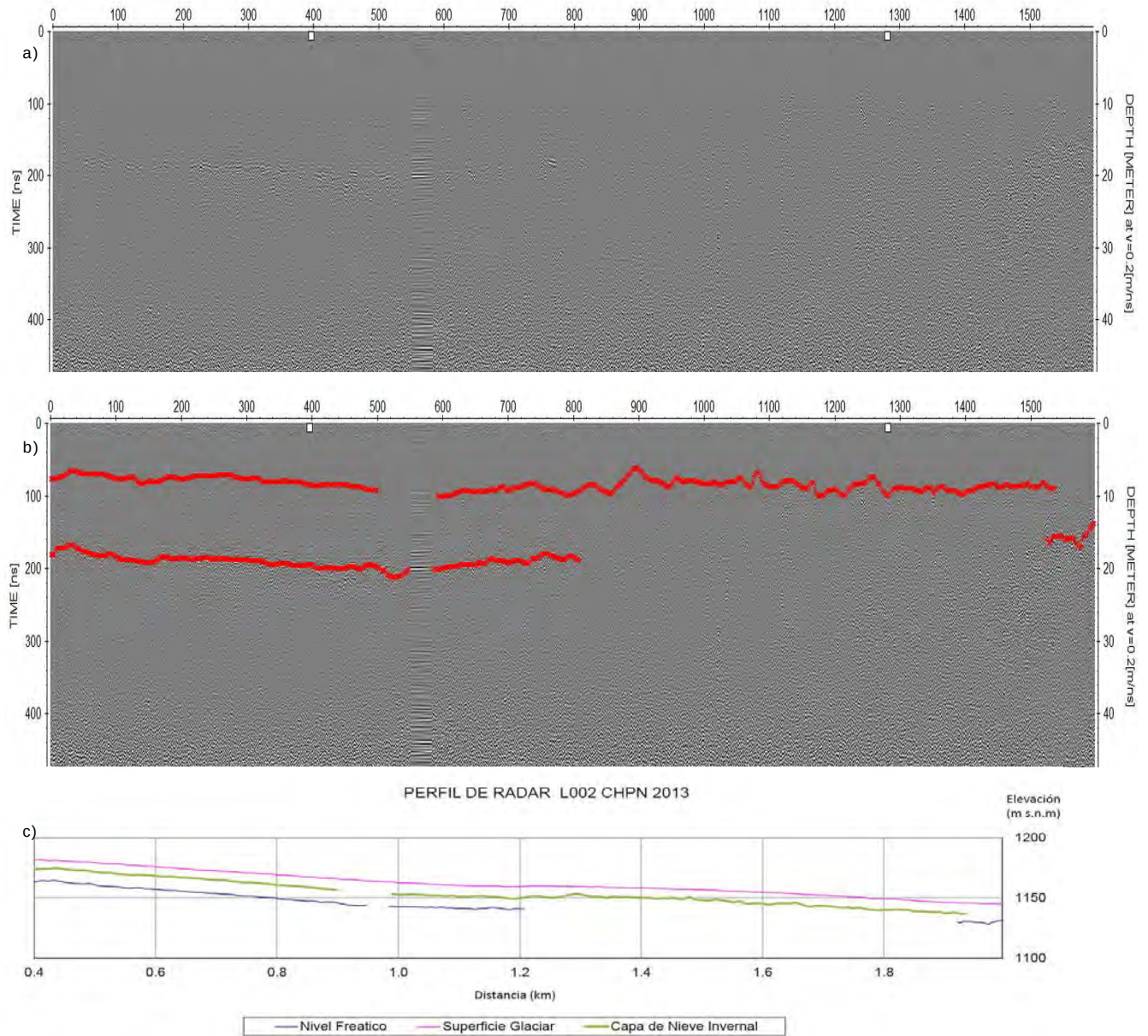


Figura 6.2-C. Perfil longitudinal L002. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja inferior es el nivel freático, mientras que la línea roja superior corresponde a la interpretación de una capa de nieve o neviza de edad desconocida, ambas dibujadas sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado), la capa de nieve o neviza (verde) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

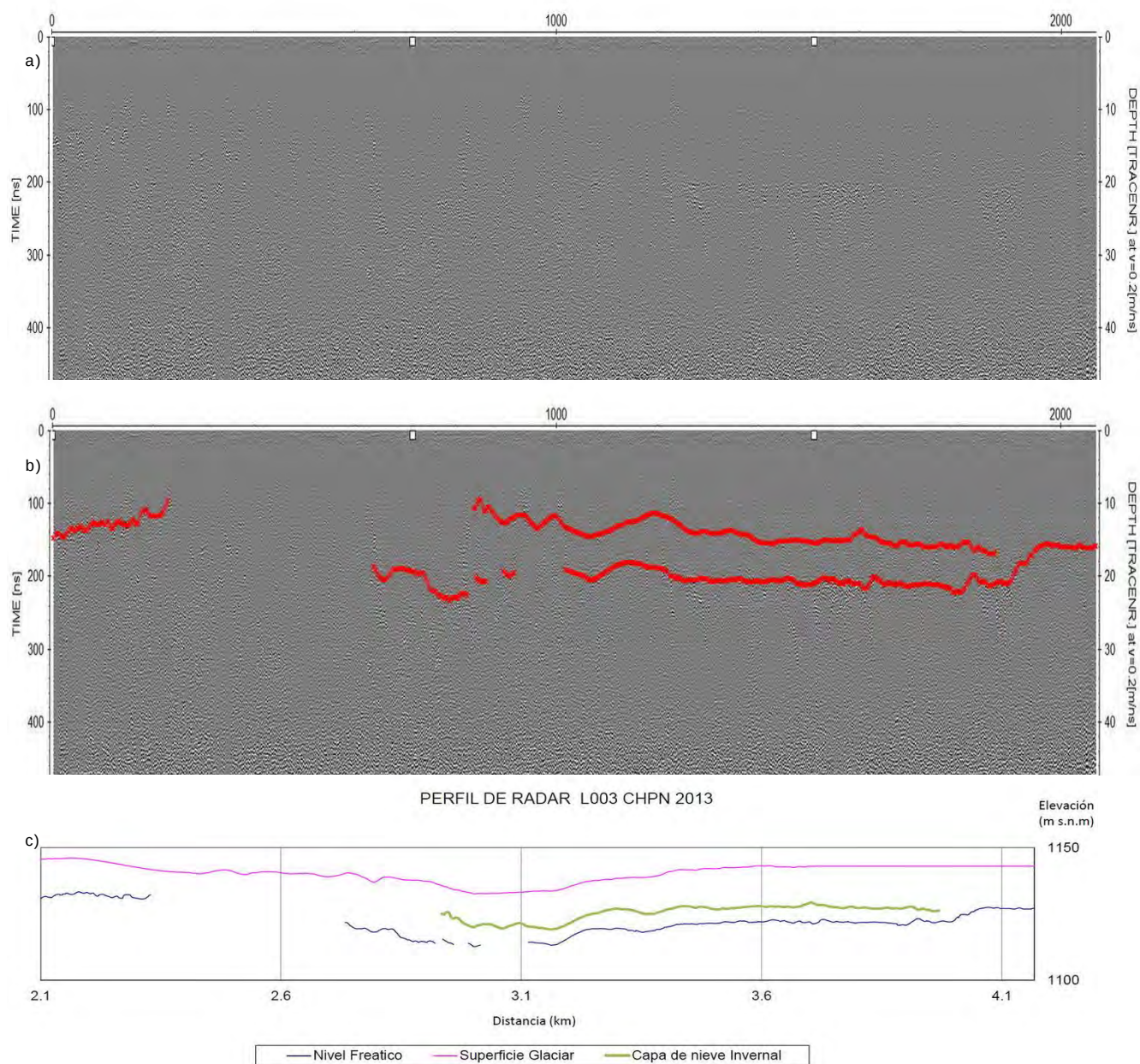


Figura 6.2-D. Perfil longitudinal L003. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación de una capa de nieve o neviza de edad desconocida, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y la capa de nieve invernal (verde), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

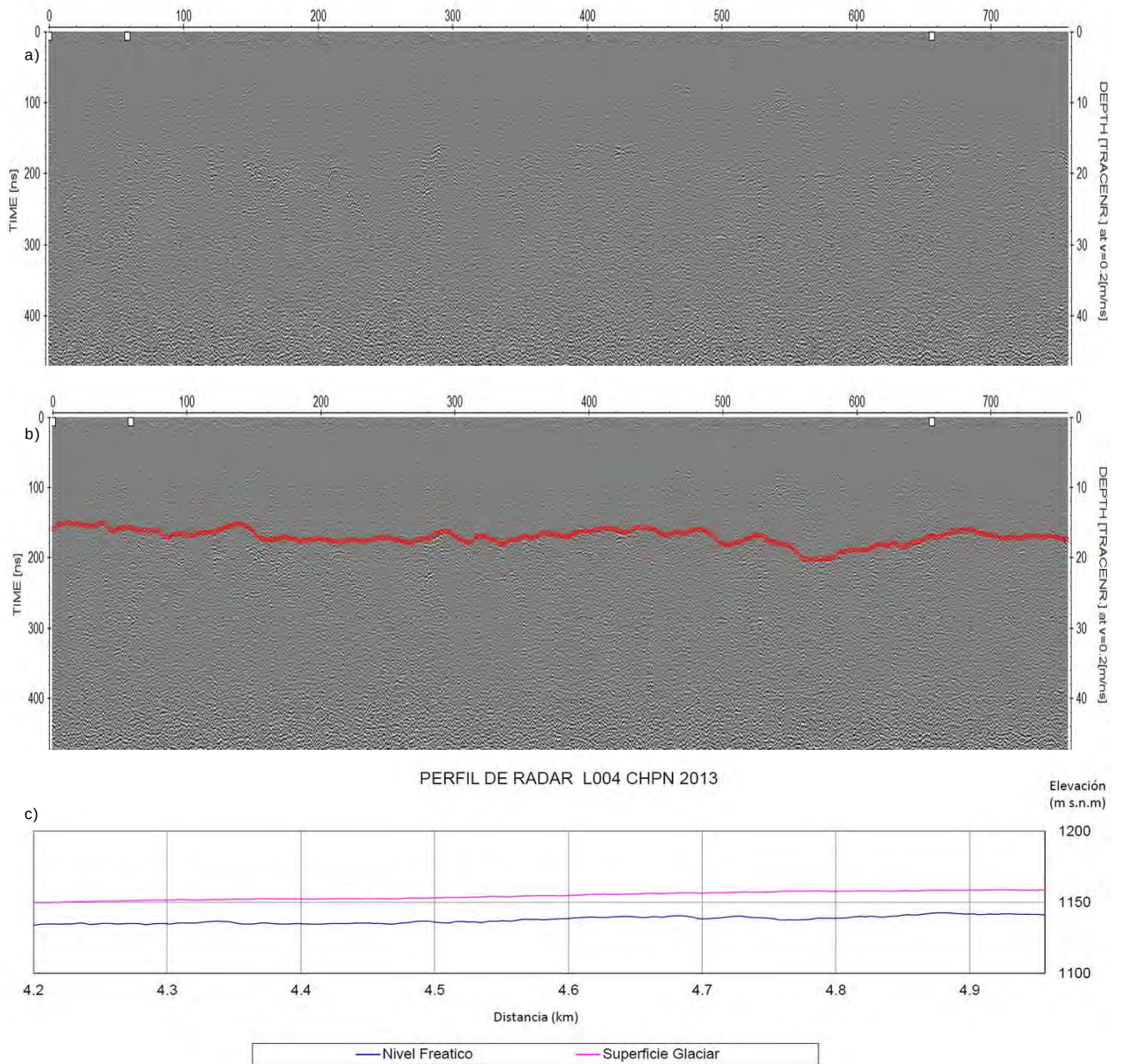


Figura 6.2-E. Perfil longitudinal L004. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

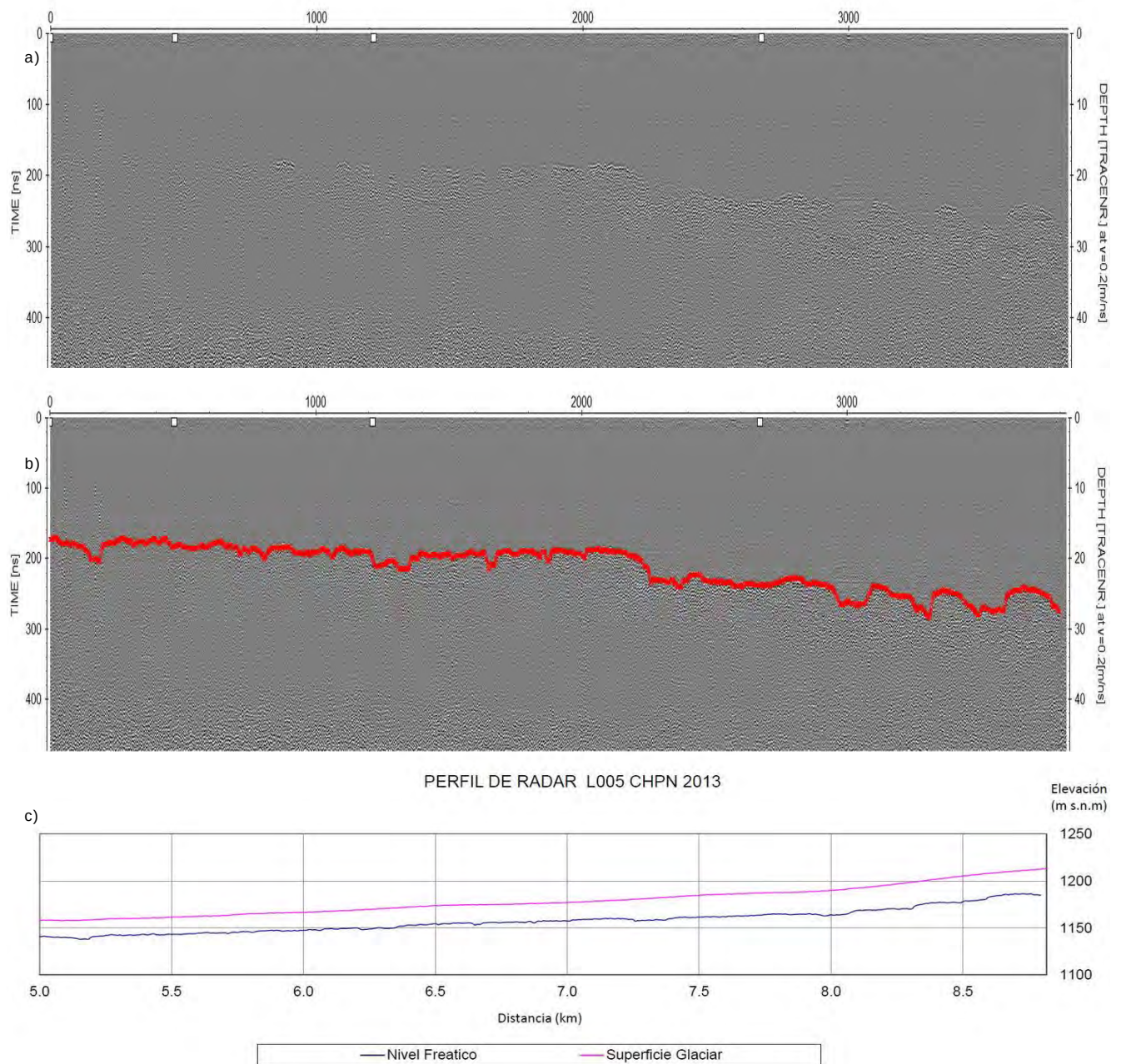


Figura 6.2-F. Perfil longitudinal L005. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

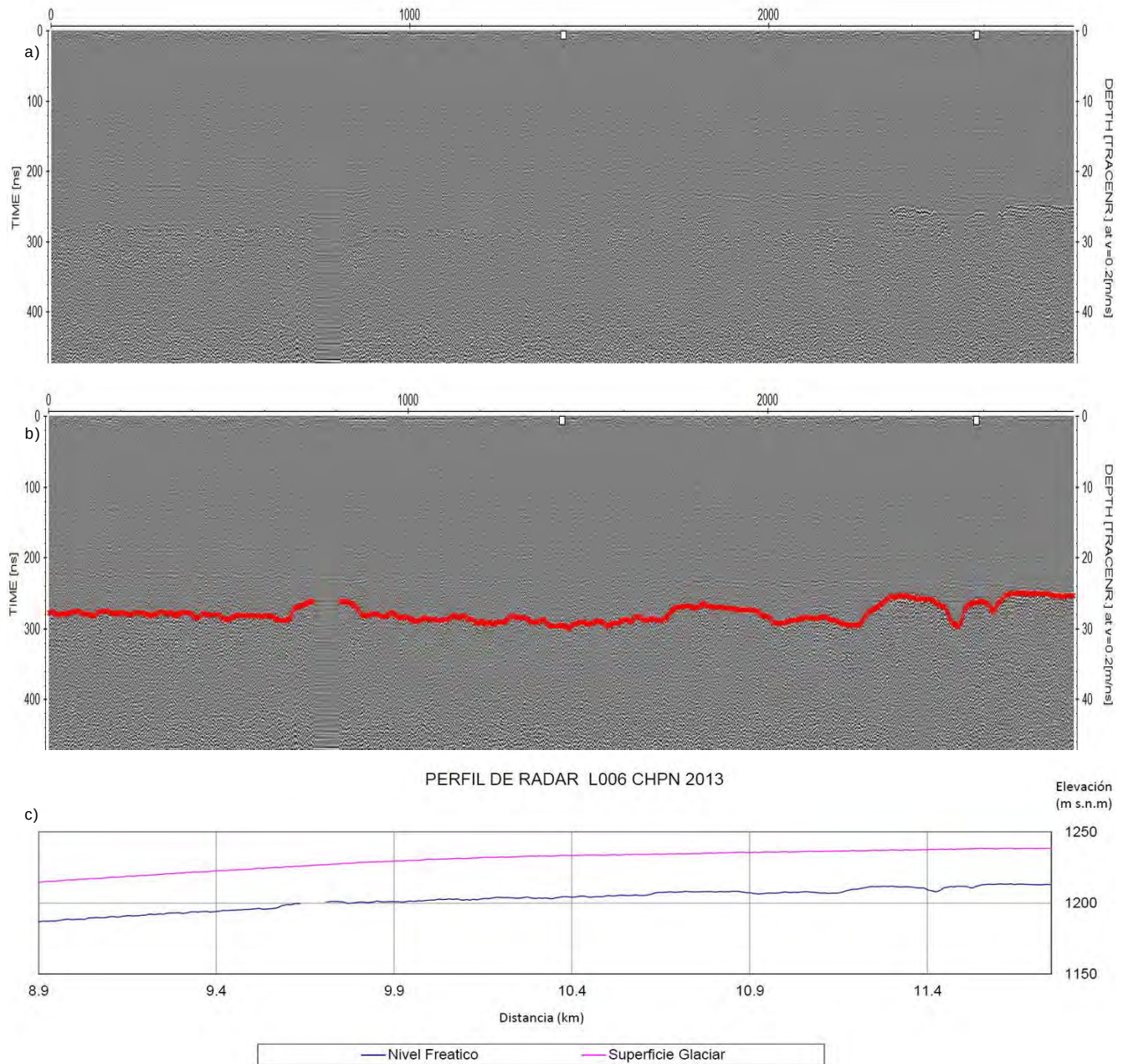


Figura 6.2-G. Perfil longitudinal L006. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

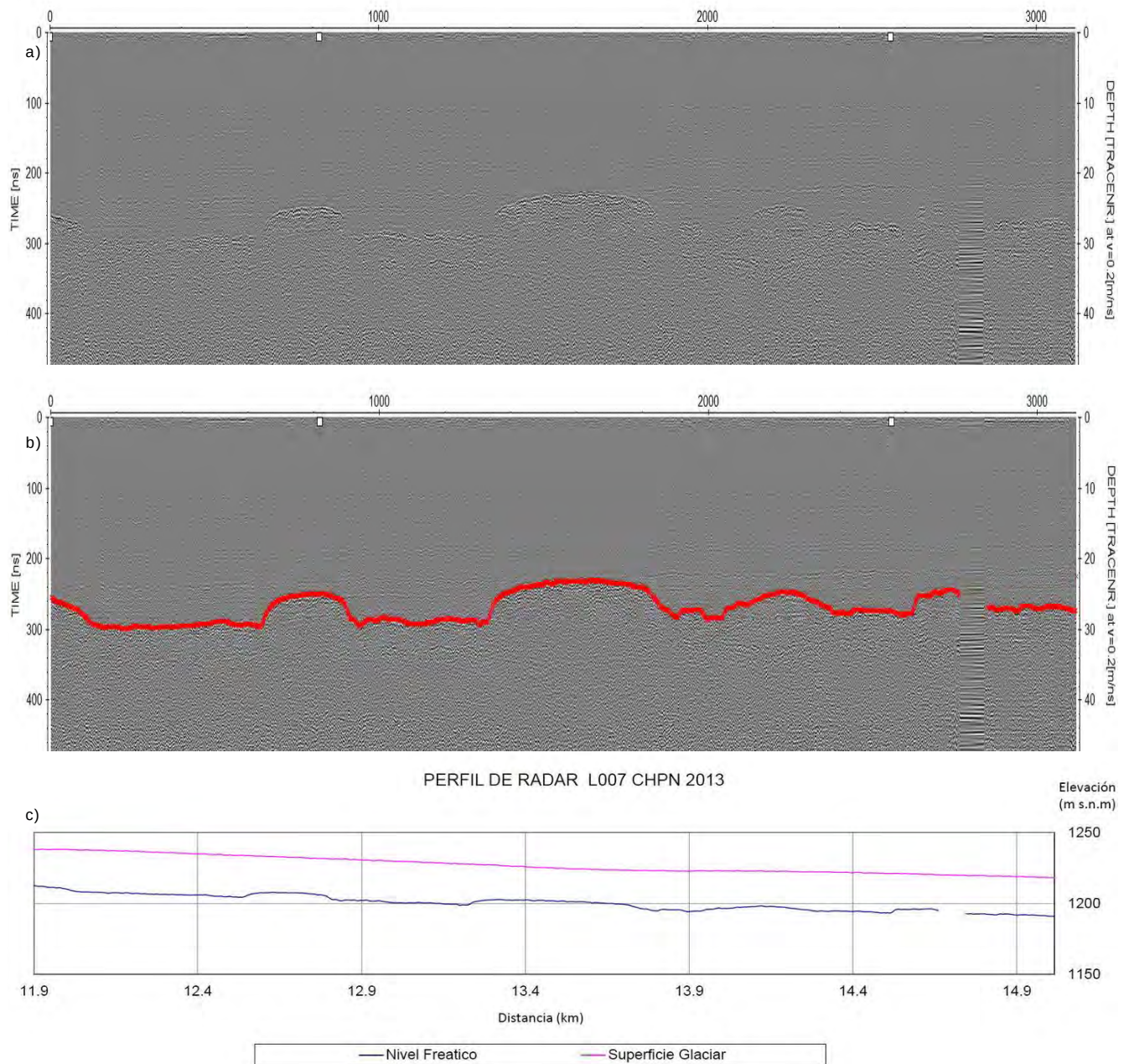


Figura 6.2-H. Perfil longitudinal L007. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

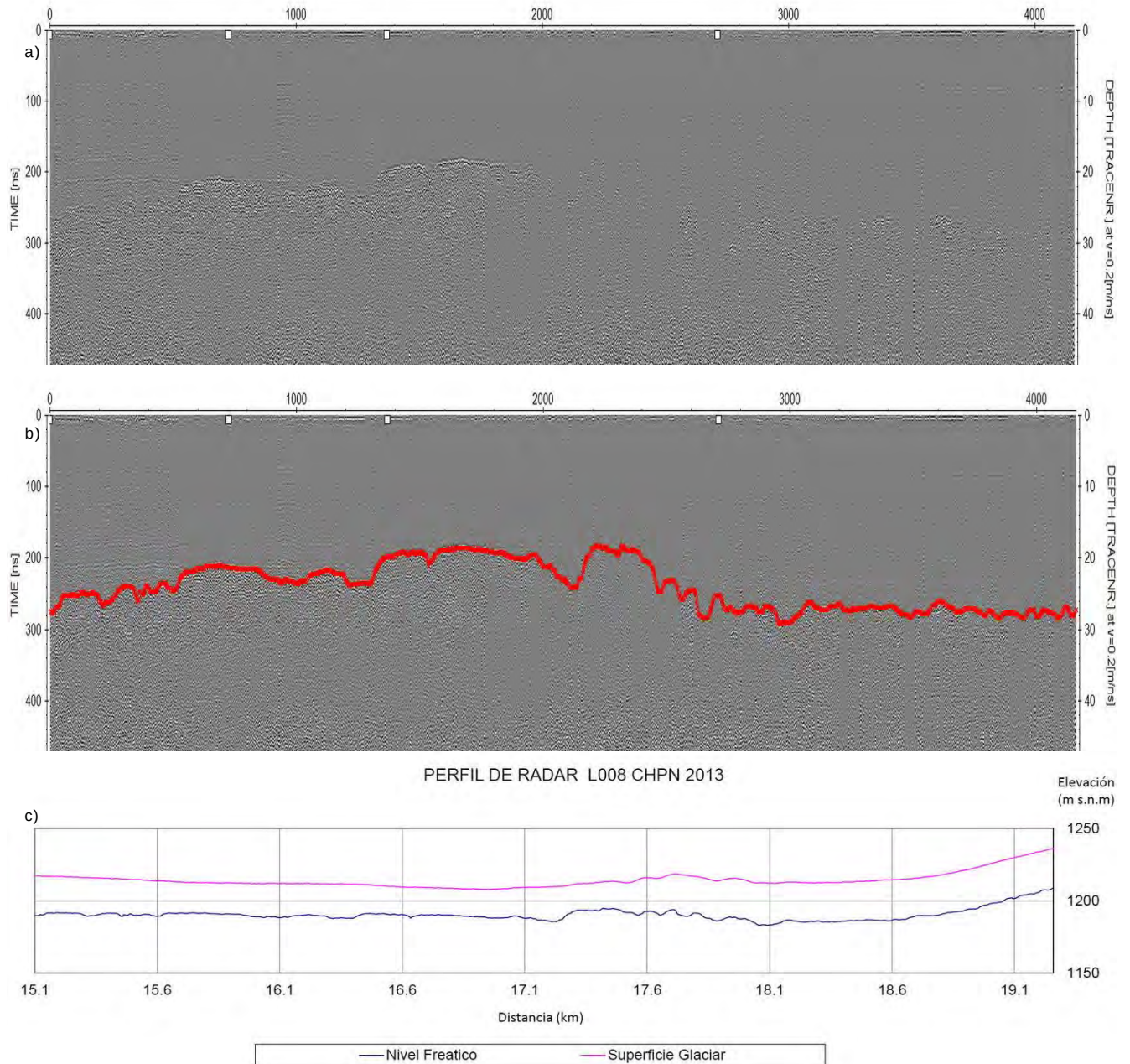


Figura 6.2-I. Perfil longitudinal L008. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

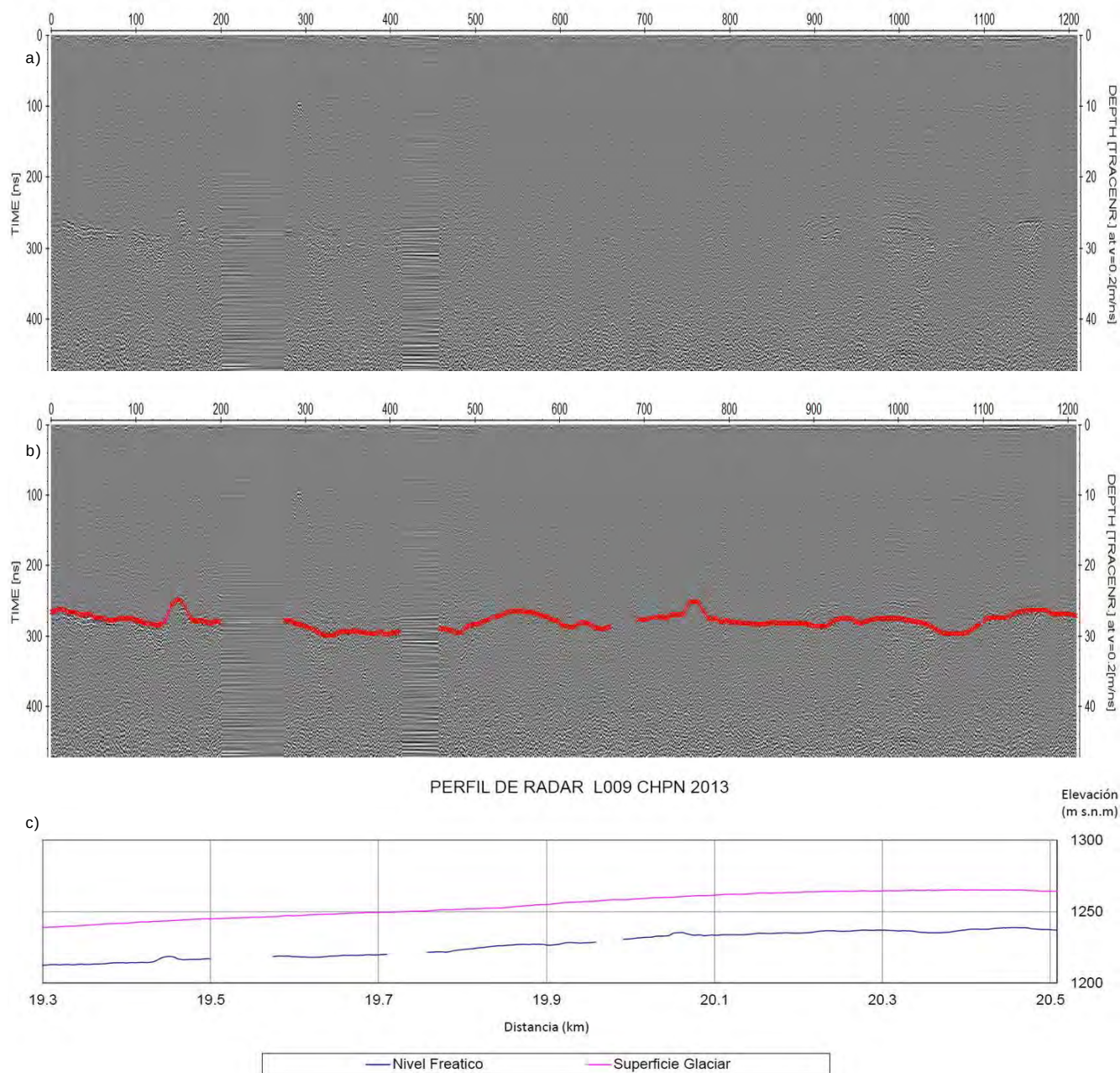


Figura 6.2-J. Perfil longitudinal L009. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

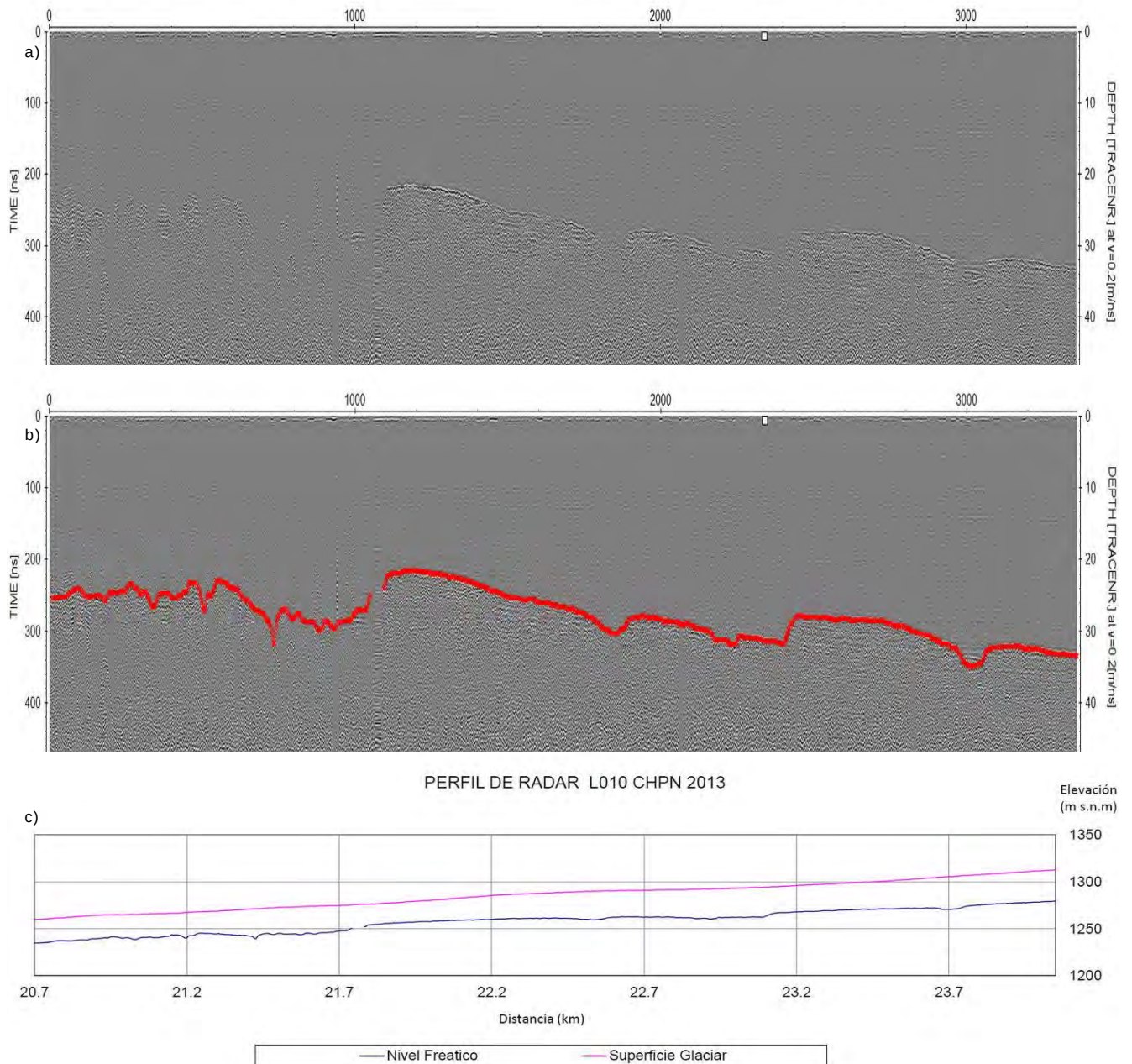


Figura 6.2-K. Perfil longitudinal L010. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

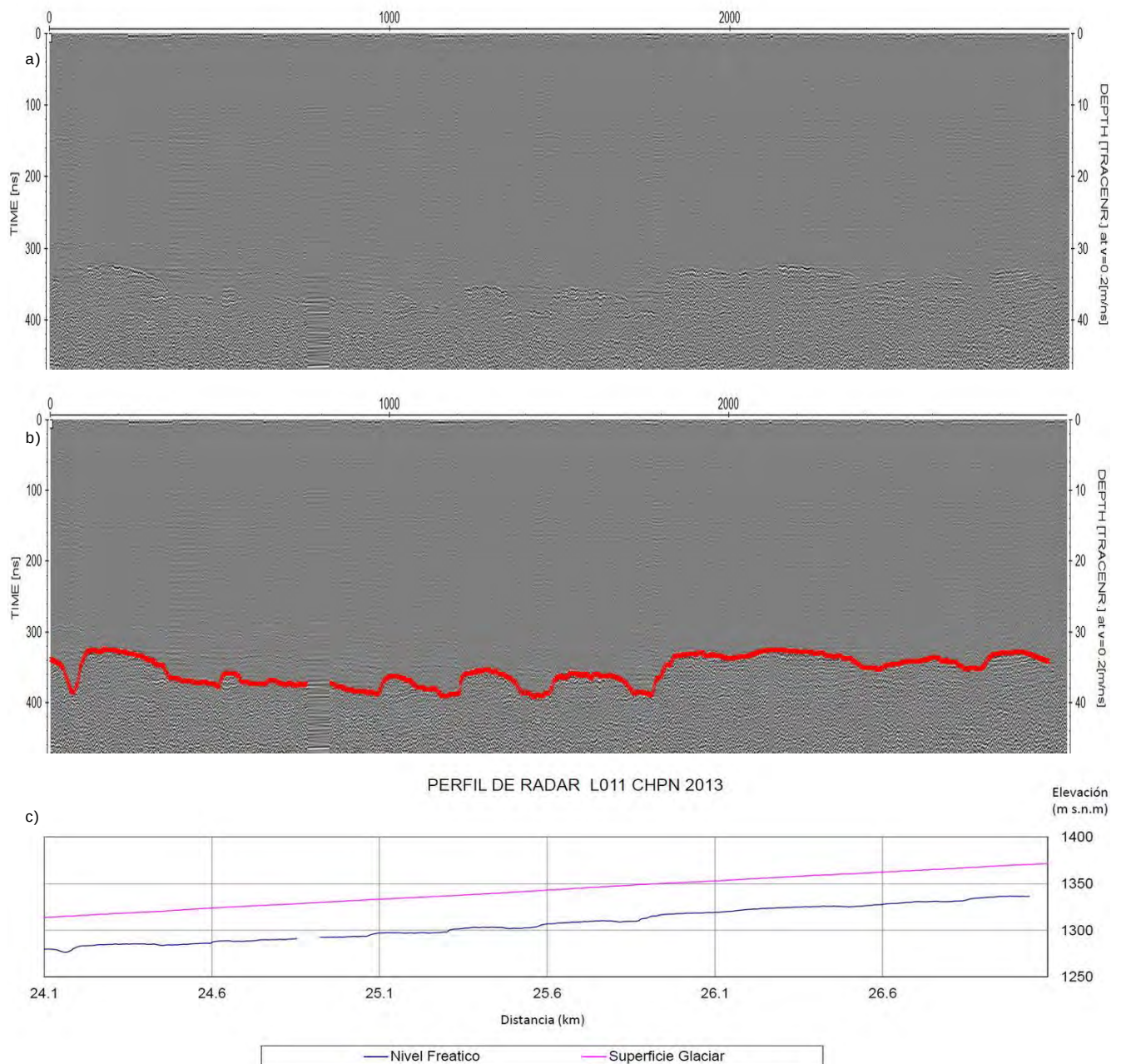


Figura 6.2-L. Perfil longitudinal L011. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

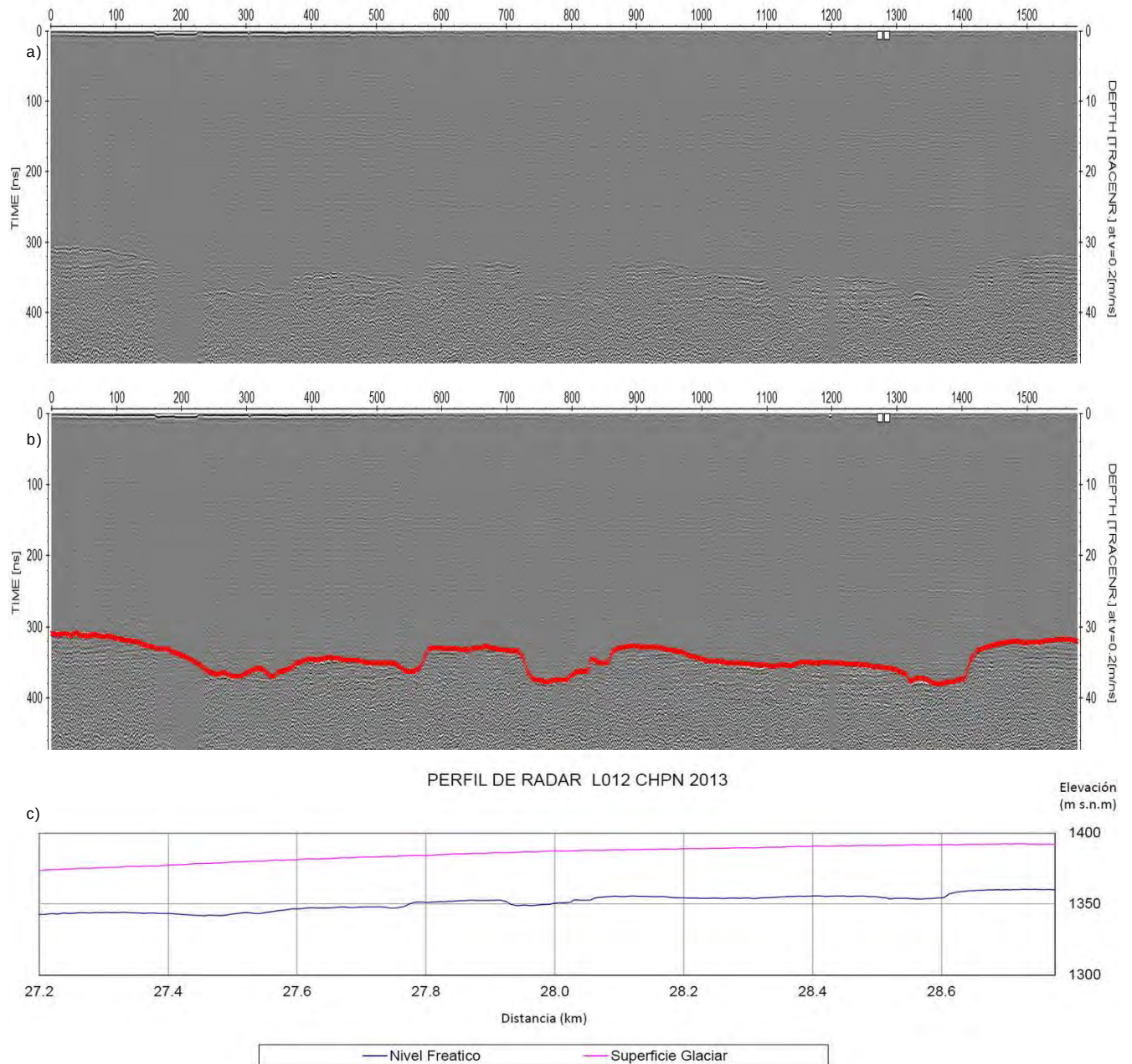


Figura 6.2-M. Perfil longitudinal L012. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

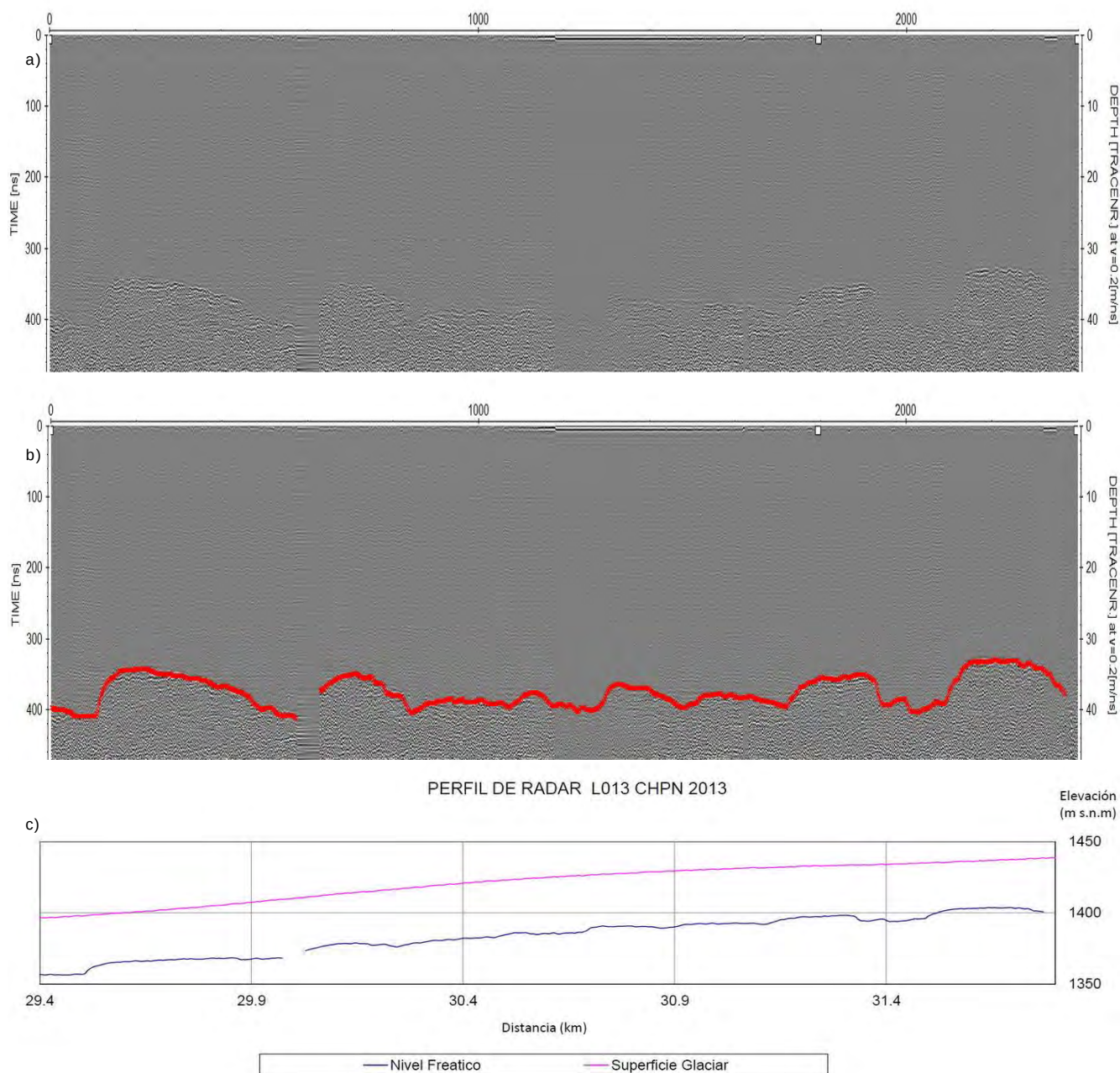


Figura 6.2-N. Perfil longitudinal L013. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

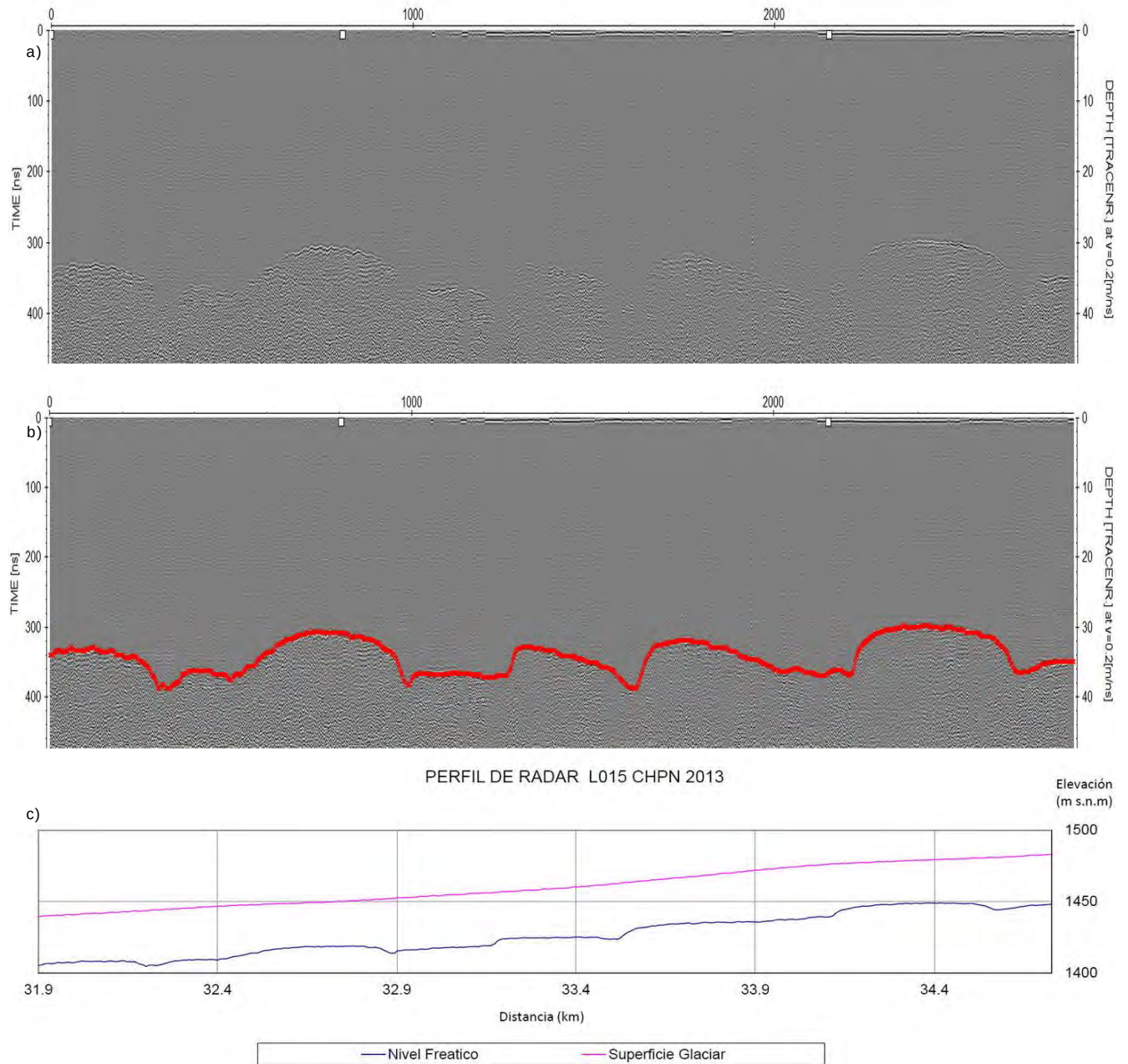


Figura 6.2-O. Perfil longitudinal L015. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

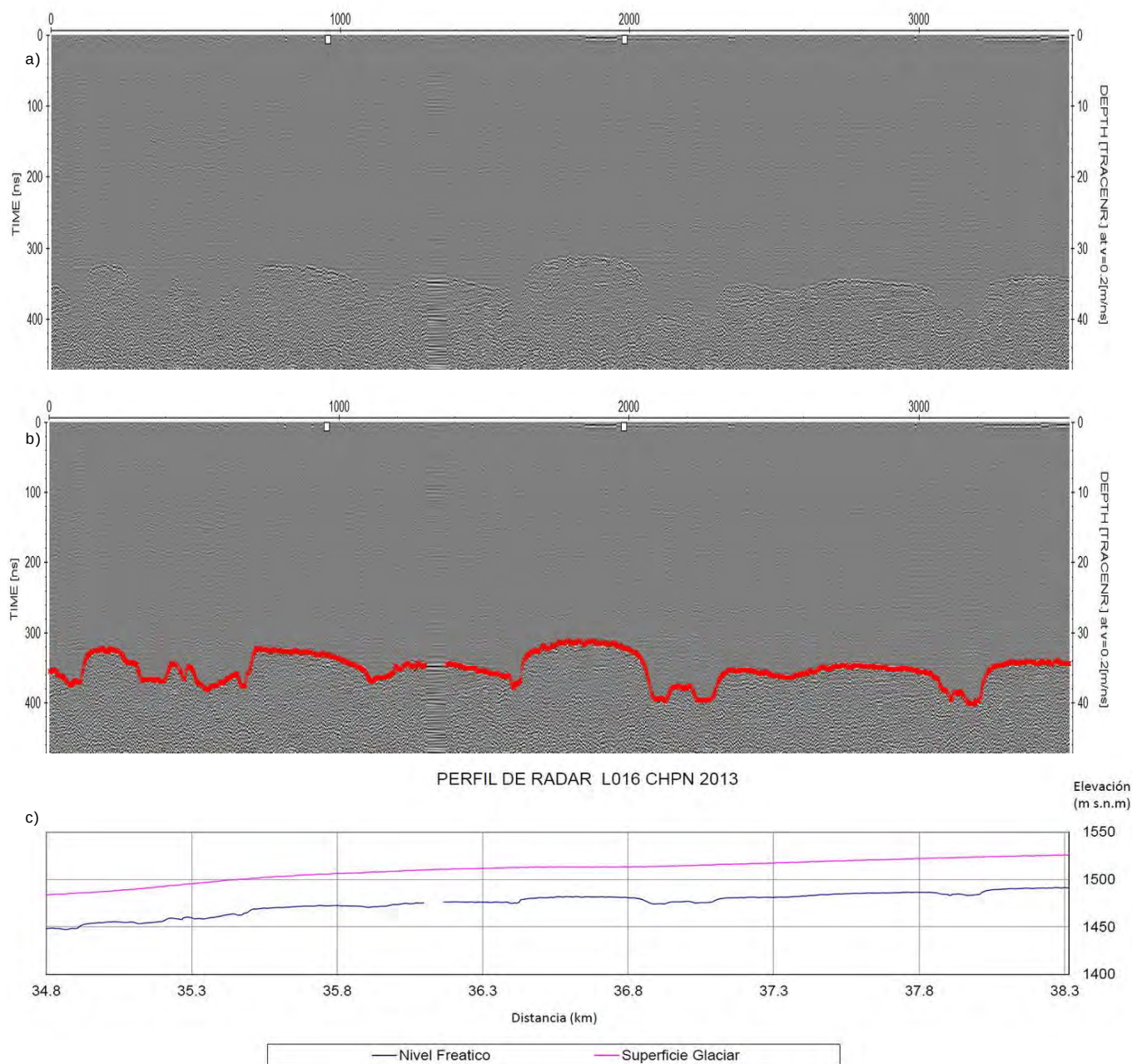


Figura 6.2-P. Perfil longitudinal L016. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

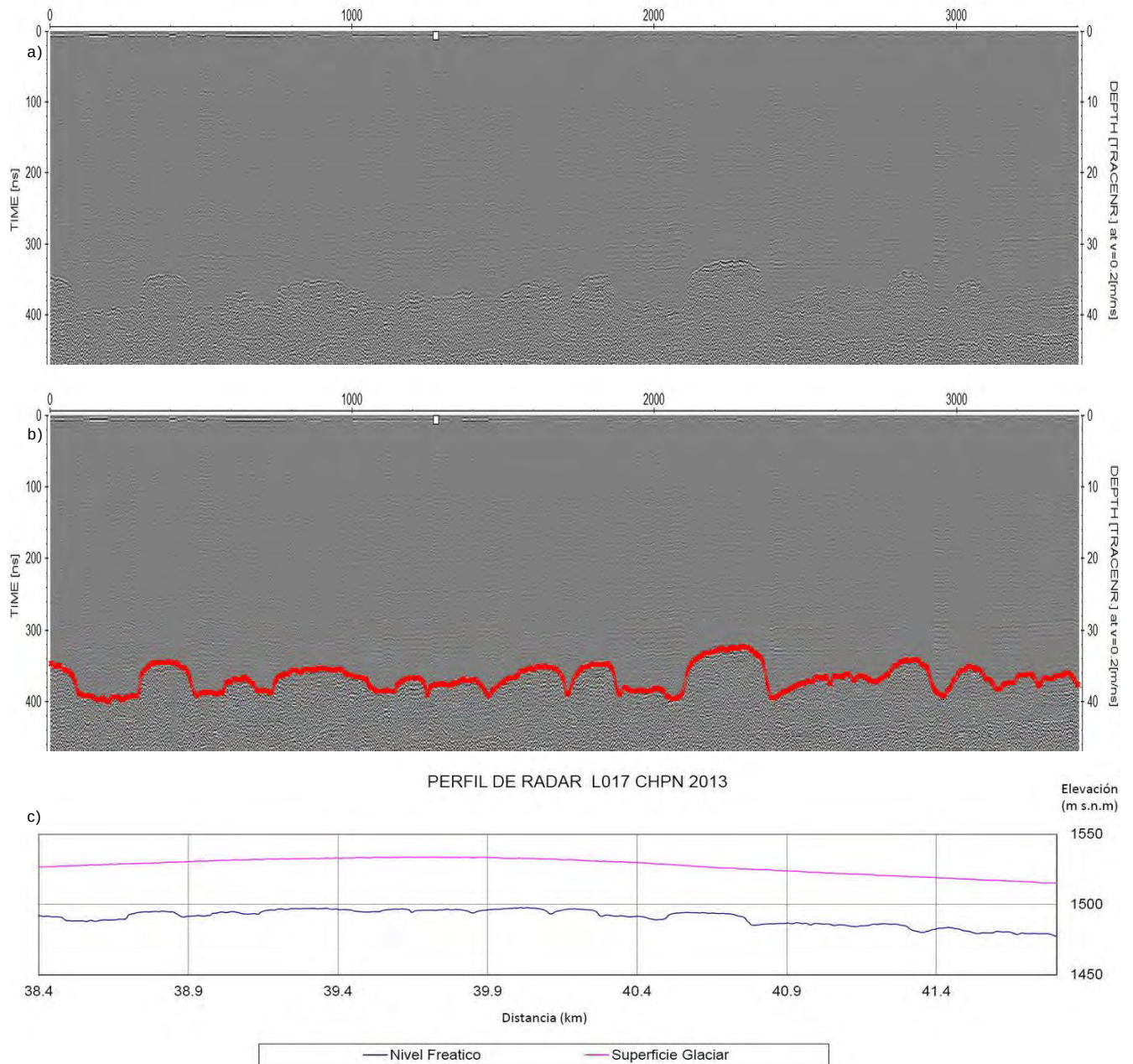


Figura 6.2-Q. Perfil longitudinal L017. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

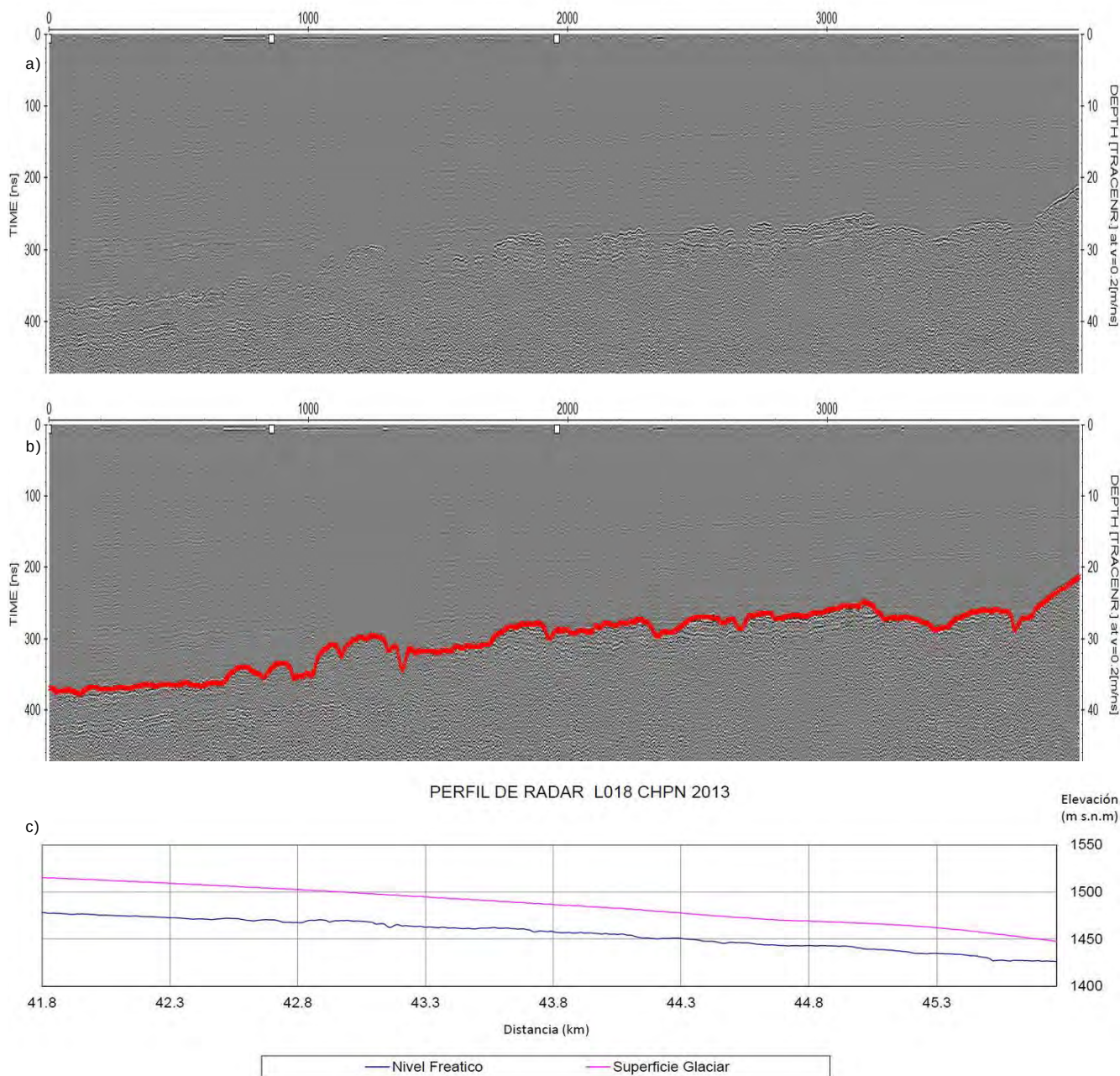


Figura 6.2-R. Perfil longitudinal L018. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

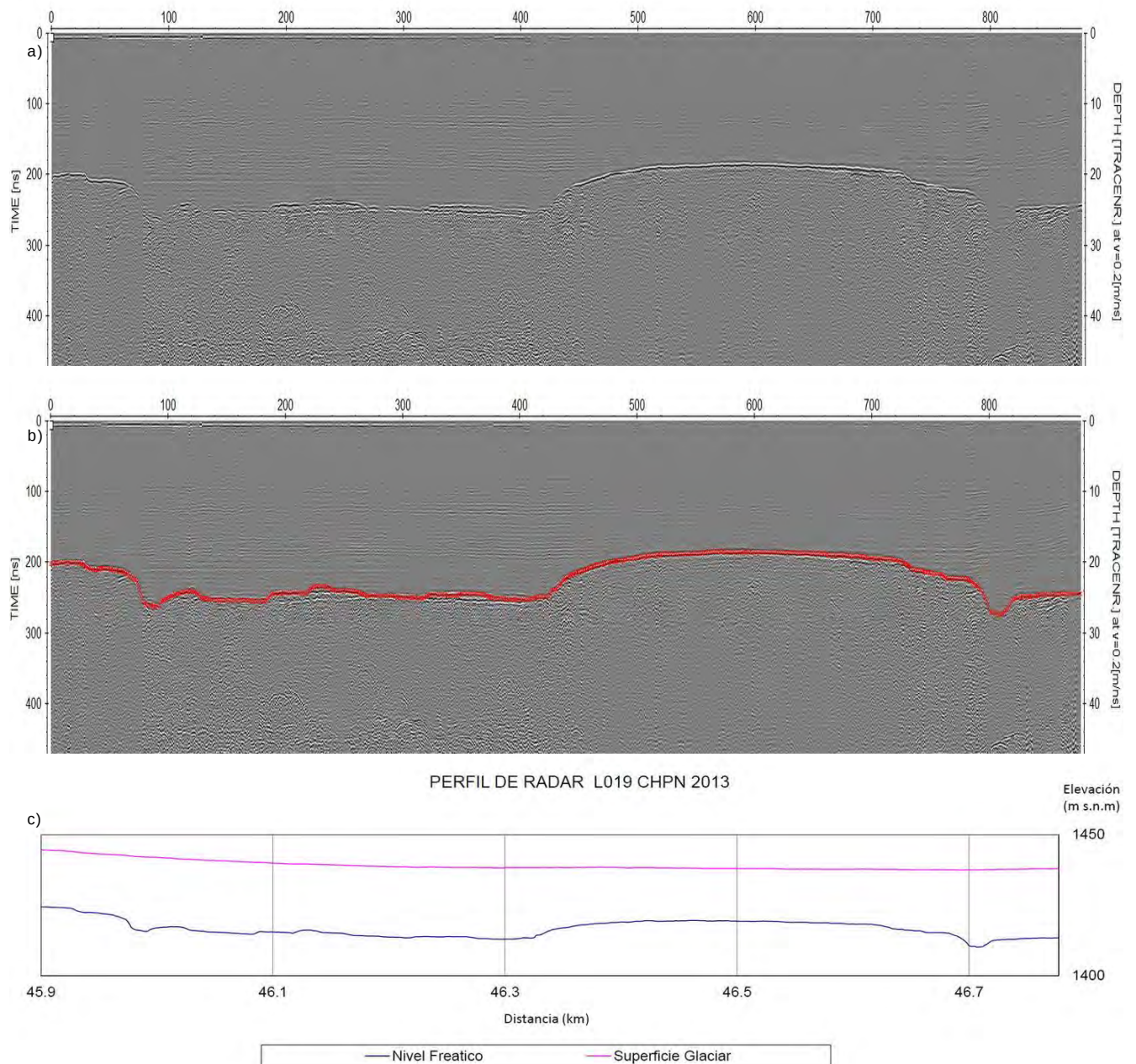


Figura 6.2-S. Perfil longitudinal L019. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L001.

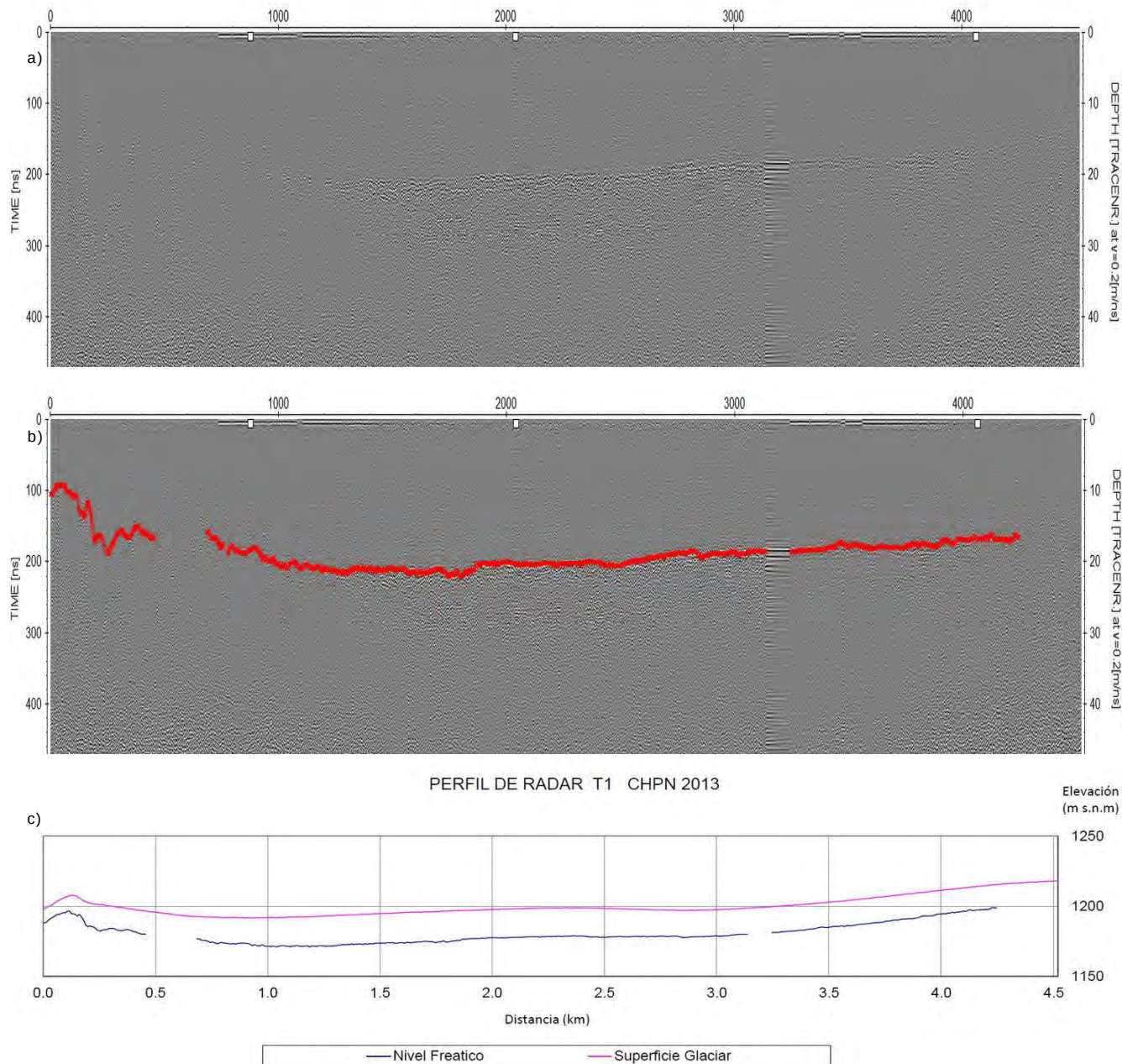


Figura 6.2-T. Perfil transversal T01, que corresponde al perfil B-B' en la Fig. 1.2-
A. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo
derecho en las 3 figuras, con el eje de abscisas representando la distancia
recorrida considerando el origen al extremo oeste del perfil. a) Radargrama
superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b)
Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel
freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). En los radargramas la
superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con
topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul).

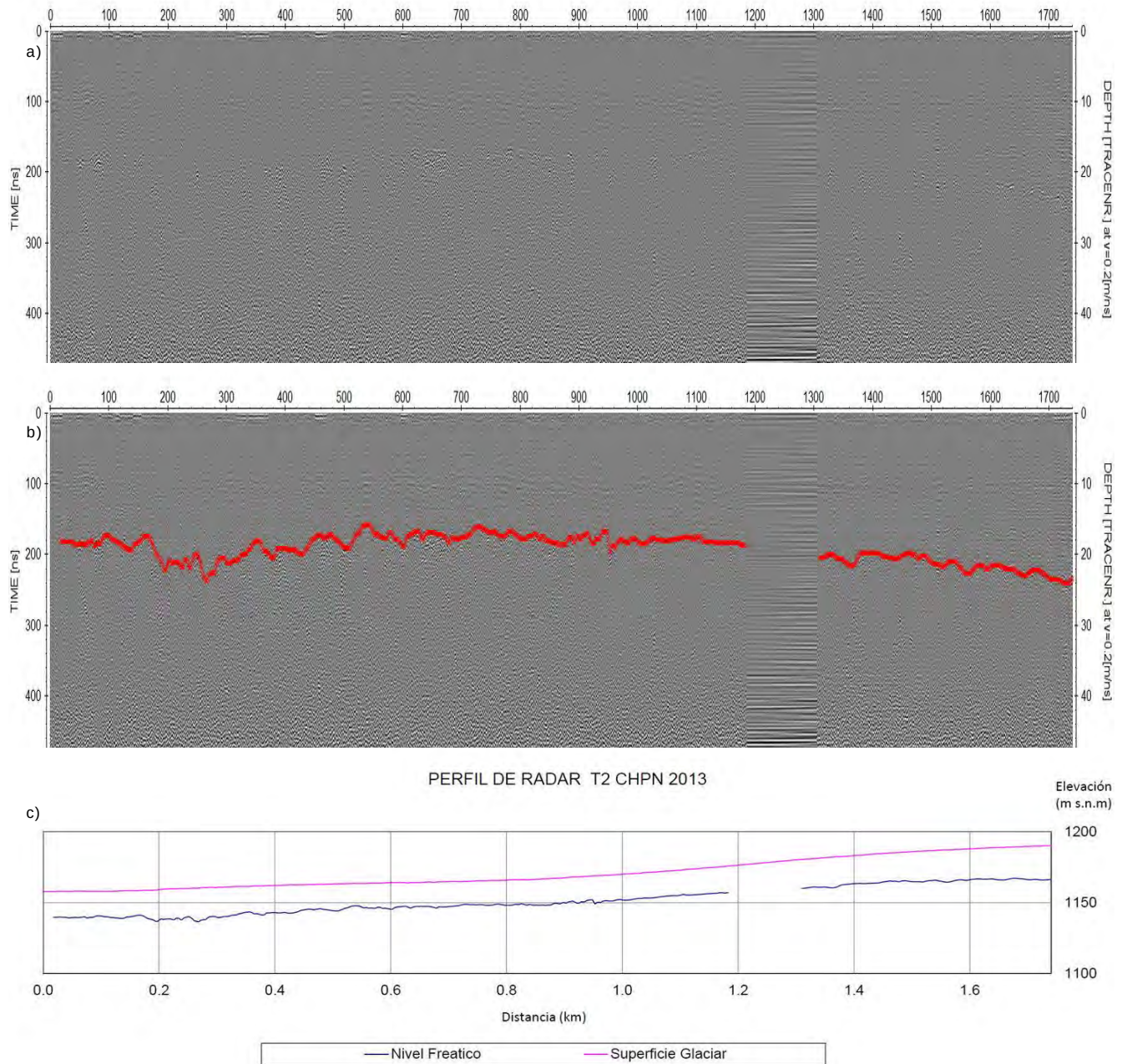


Figura 6.2-U. Perfil transversal T02, que corresponde al perfil C-C' en la Fig. 1.2-A. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras, con el eje de abscisas representando la distancia recorrida considerando el origen al extremo oeste del perfil. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul).

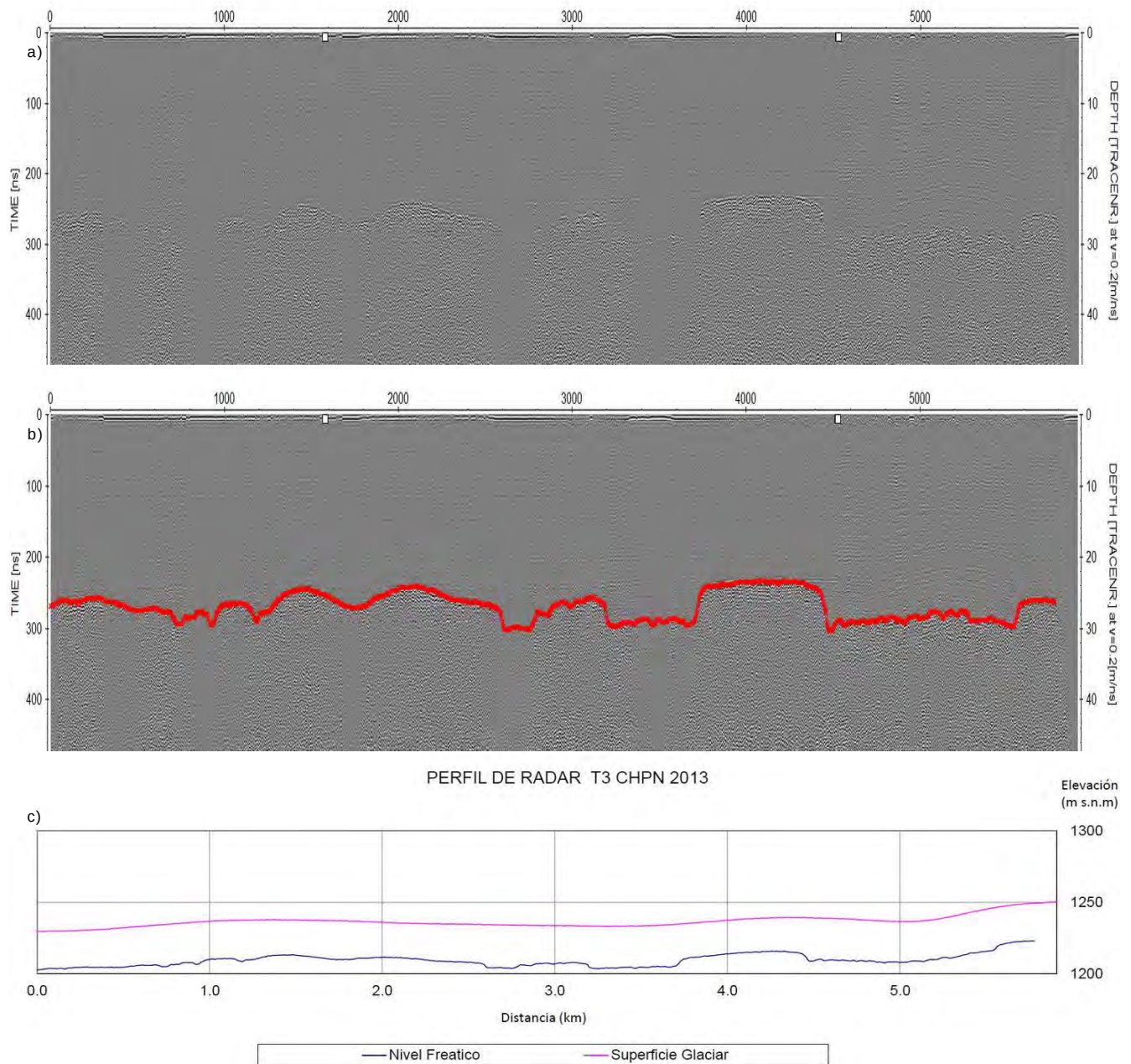


Figura 6.2-V. Perfil transversal T03, que corresponde al perfil D-D' en la Fig. 1.2-A. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras, con el eje de abscisas representando la distancia recorrida considerando el origen al extremo oeste del perfil. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul).

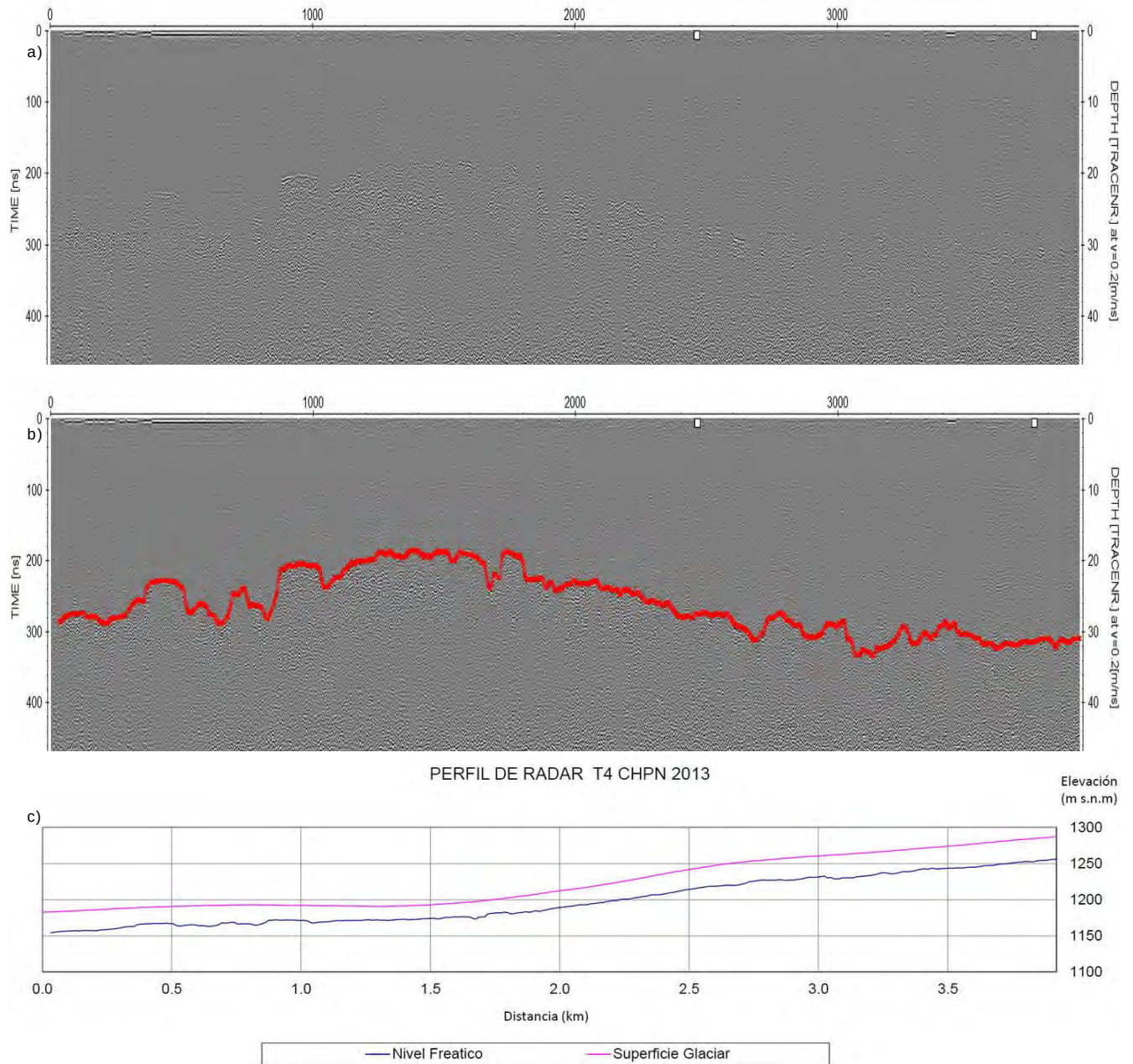


Figura 6.2-W. Perfil transversal T04, que corresponde al perfil E-E' en la Fig. 1.2-A. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras, con el eje de abscisas representando la distancia recorrida considerando el origen al extremo oeste del perfil. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul).

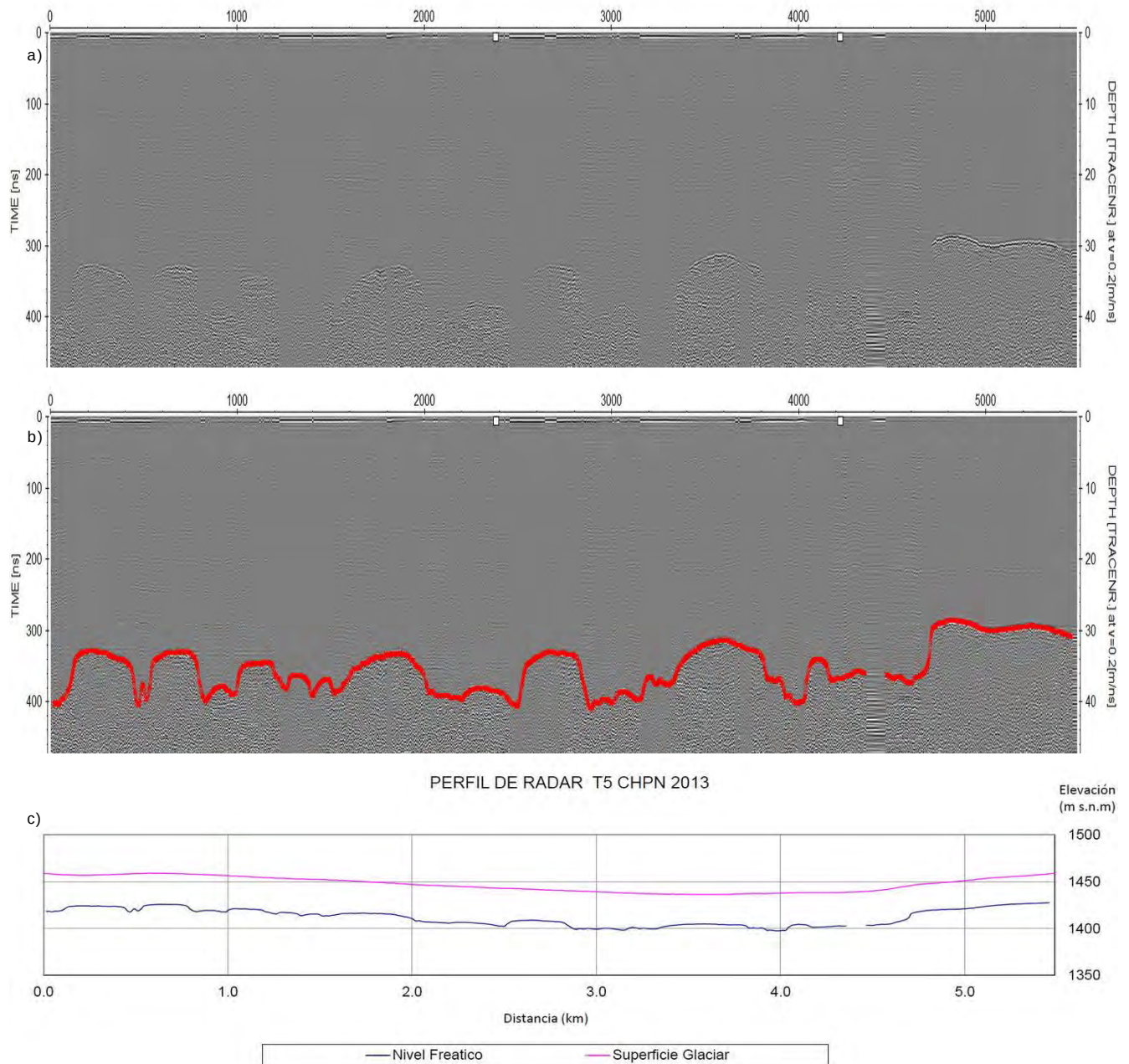


Figura 6.2-X. Perfil transversal T05, que corresponde al perfil F-F' en la Fig. 1.2-A. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras, con el eje de abscisas representando la distancia recorrida considerando el origen al extremo oeste del perfil. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior: corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul).

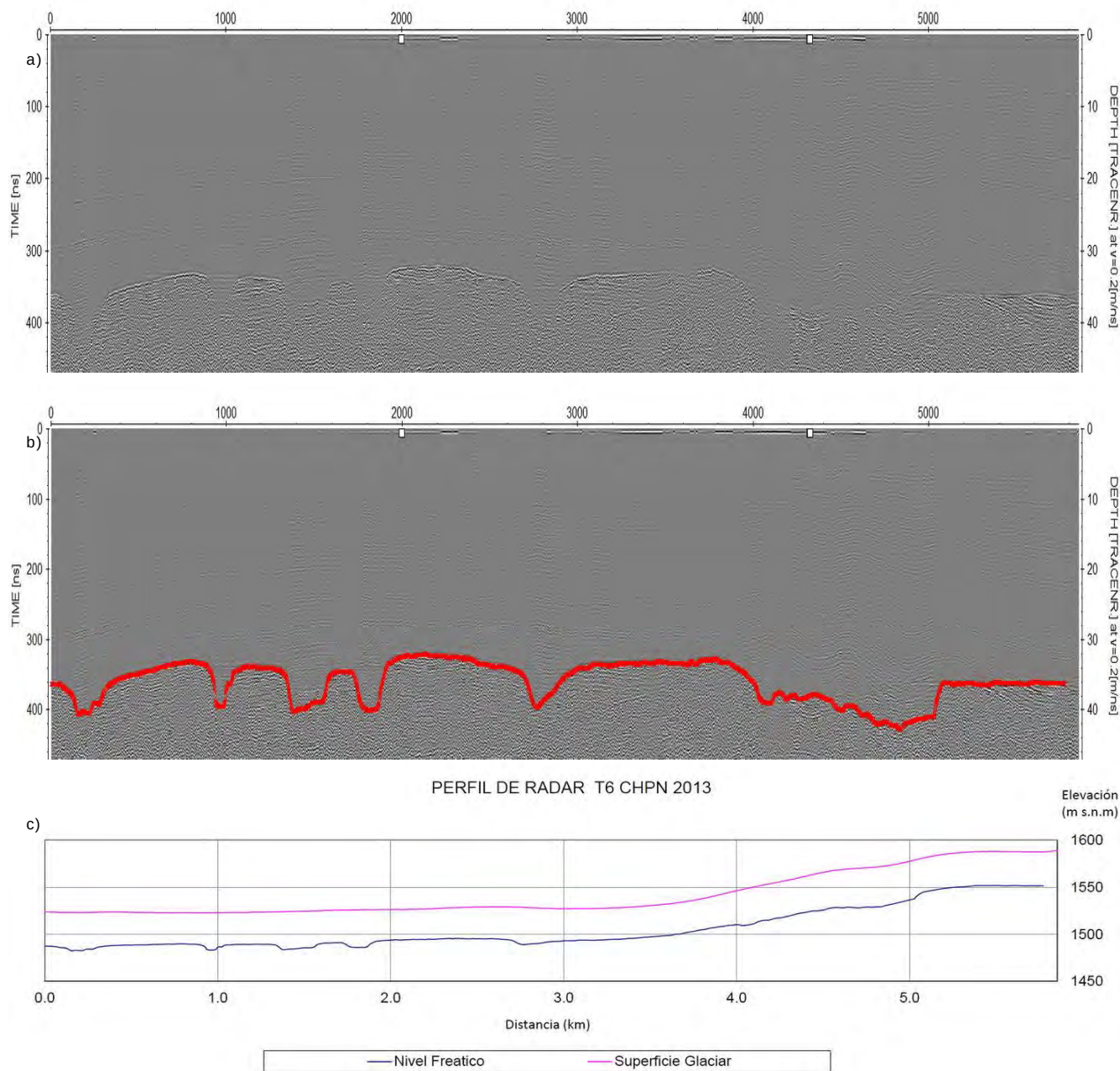


Figura 6.2-Y. Perfil transversal T06, que corresponde al perfil G-G' en la Fig. 1.2-A. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras, con el eje de abscisas representando la distancia recorrida considerando el origen al extremo oeste del perfil. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul).

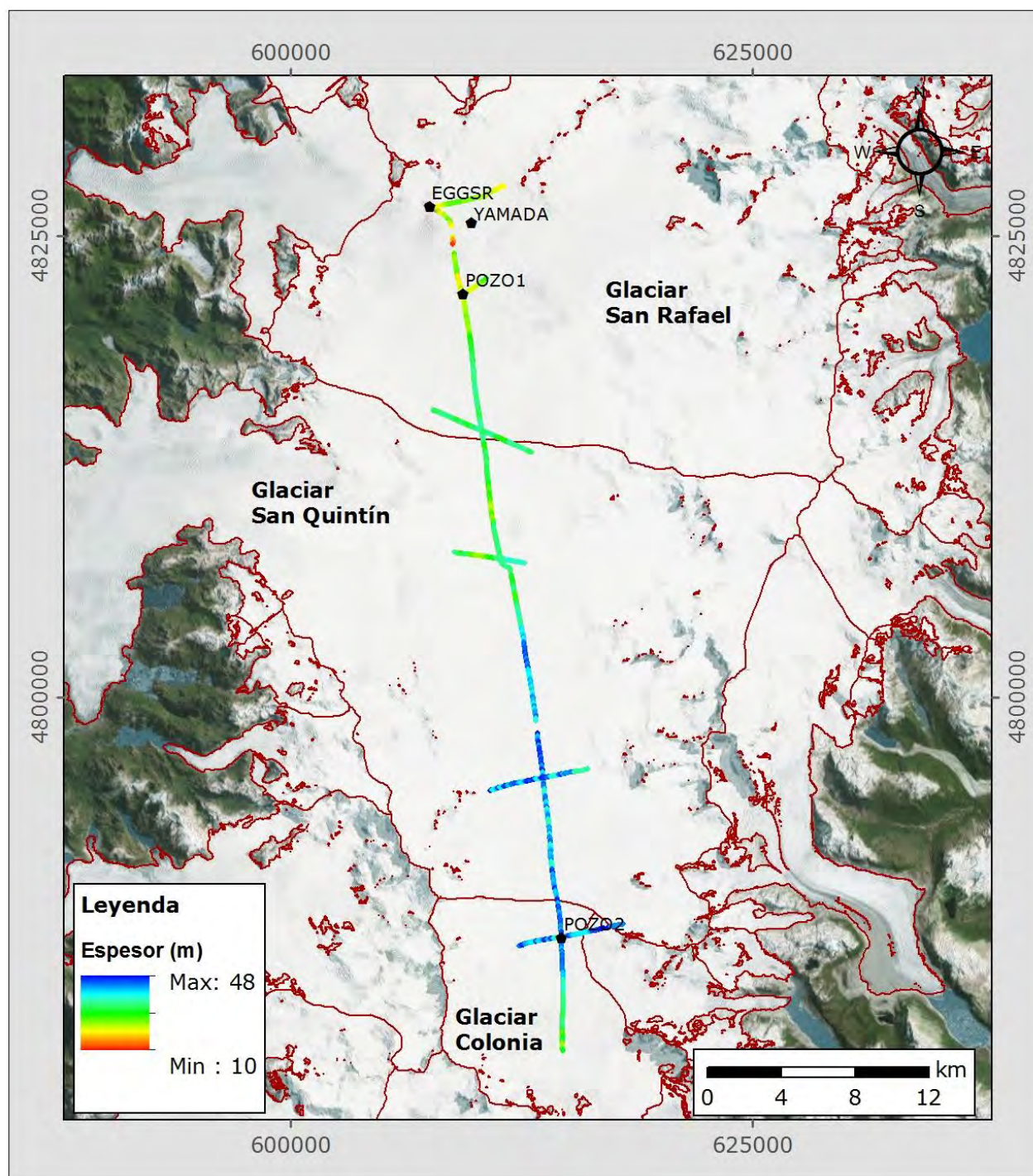


Figura 6.2-Z. Profundidad del nivel freático interpretado a partir de los datos GPR de 2013. Se indican los nombres de los perfiles correspondientes a las Figs. 6.2-A a Y. "Yamada" representa la posición de la perforación realizada por Yamada (1987).

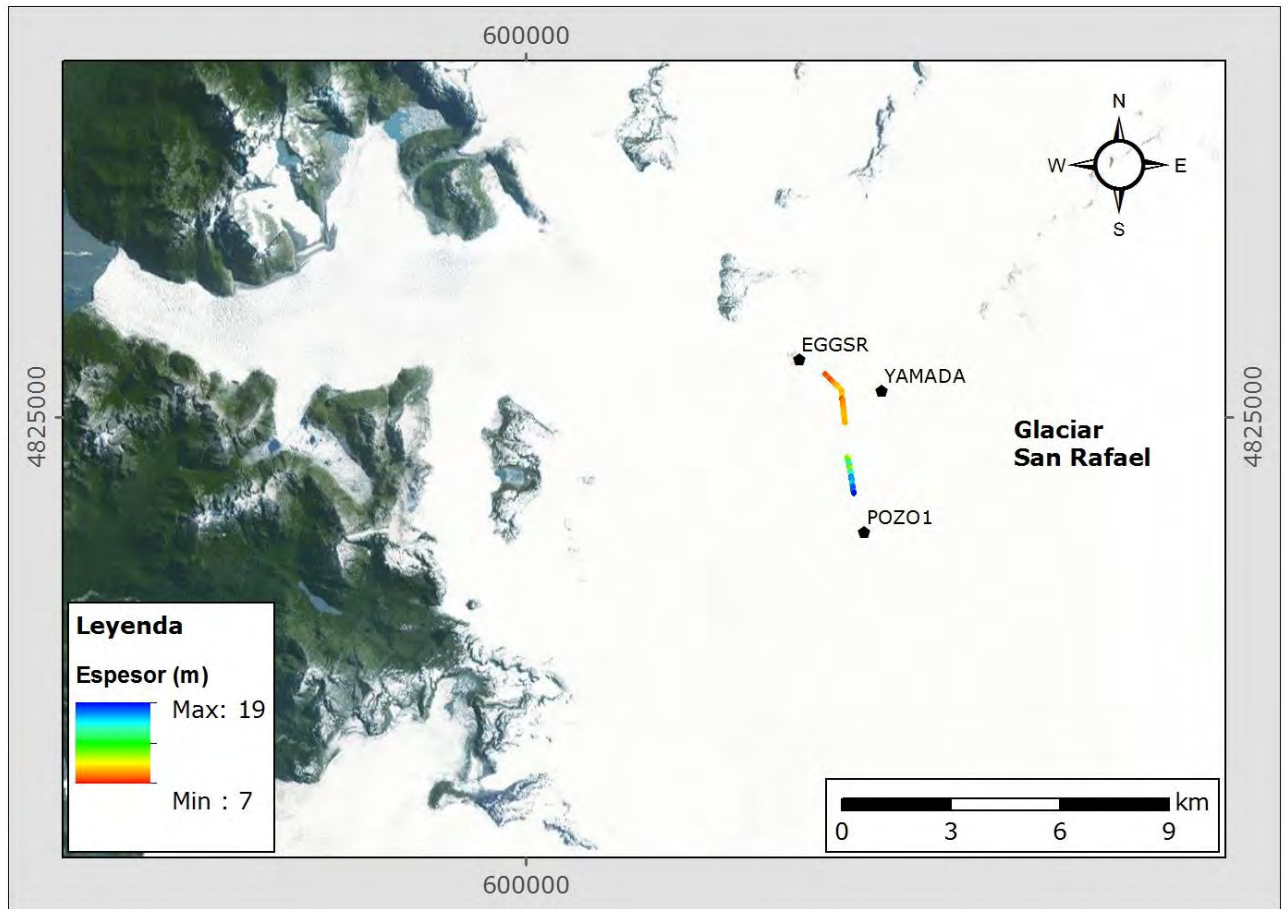


Figura 6.2-AA. Profundidad de una capa de nieve o neviza, de edad desconocida, interpretada a partir de los datos GPR de 2013. Se indican los nombres de los perfiles correspondientes a las Figs.6.2-B.

6.3. RESULTADOS GPR 2014

A continuación (Tabla 6.3-A, perfiles L009 a L021 y L001 a L003, Figs. 6.3-A a 6.3-R) se muestran los resultados de 16 archivos GPR longitudinales, donde el eje de las abscisas tiene el origen en el km 0, 300 m al sureste del refugio EGGSR, en la baliza 1 donde se iniciaron las mediciones GPR. En todos los perfiles longitudinales se interpreta el reflector prominente más profundo, que es claramente identificable en forma muy continua a lo largo de los perfiles. Debido a su profundidad, que varía entre 7.6 m y 41,5 m (Tabla 6.3-A), se interpreta que corresponde al nivel freático descrito por Yamada (1987). De hecho, en el lugar del perfil GPR más cercano al sitio de perforación de Yamada (1987), ubicado 1.100 m al este del perfil L009 (Fig. 5.3.2-Q) este reflector se ubica a una profundidad de 17.6 m, similar a la profundidad de 24.9 m detectada por Yamada (1987) para el nivel freático. Si efectivamente se trata del nivel freático, representaría entonces 4 años de acumulación de nieve según Yamada (1987), por lo cual un cálculo preliminar de acumulación anual promedio en 4 años correspondería al 25% de la profundidad del nivel freático, vale decir entre 1,9 y 10,4 m/año. Asumiendo una densidad promedio cercana a 0.6 g/cm³ para la capa de neviza y nieve sobre el nivel freático (Yamada, 1987) esto resultaría en acumulaciones anuales de 1,1 m y 6,2 m eq.a. (equivalente en agua) para la zona. En la Fig. 6.3-R se ilustran los valores de la napa freática para todos los perfiles de 2014.

Entre el reflector que se asume es el nivel freático y la superficie aparecen varios reflectores, pero ninguno muy prominente en los perfiles de 2014, y tampoco es posible correlacionarlos con acumulación anual o multi-anual.

Tabla 6.3-A. Características de los perfiles de radar adquiridos en la campaña de agosto de 2014. Las dos columnas de la derecha corresponden al rango de las profundidades de la napa freática en cada perfil.

Perfil	Tipo de perfil	Distancia (m)	Nº de trazas	Prof. mínima	Prof. máxima
L009	Longitudinal	2.879,4	31.482	8,17	20,47
L010	Longitudinal	2.268,2	25.068	7,59	21,35
L011	Longitudinal	1.365,9	30.868	8,00	18,50
L012	Longitudinal	1.898,0	31.294	15,71	22,52
L013	Longitudinal	2.096,0	32.767	20,53	24,84
L014	Longitudinal	2.437,7	23.588	23,14	26,98
L015	Longitudinal	2.485,9	31.600	22,11	26,99
L016	Longitudinal	3.204,0	30.134	16,41	24,58
L017	Longitudinal	3.081,0	31.776	20,53	28,86
L018	Longitudinal	3.994,0	32.766	19,79	35,93
L019	Longitudinal	3.482,5	30.170	30,38	37,65
L020	Longitudinal	1.237,8	18.908	30,54	37,96
L021	Longitudinal	841,9	10.950	33,34	39,05
L001	Longitudinal	2.150,0	31.128	29,26	38,10
L002	Longitudinal	3.525,0	31.390	31,44	41,45
L003	Longitudinal	1.124,8	14.222	34,19	40,89

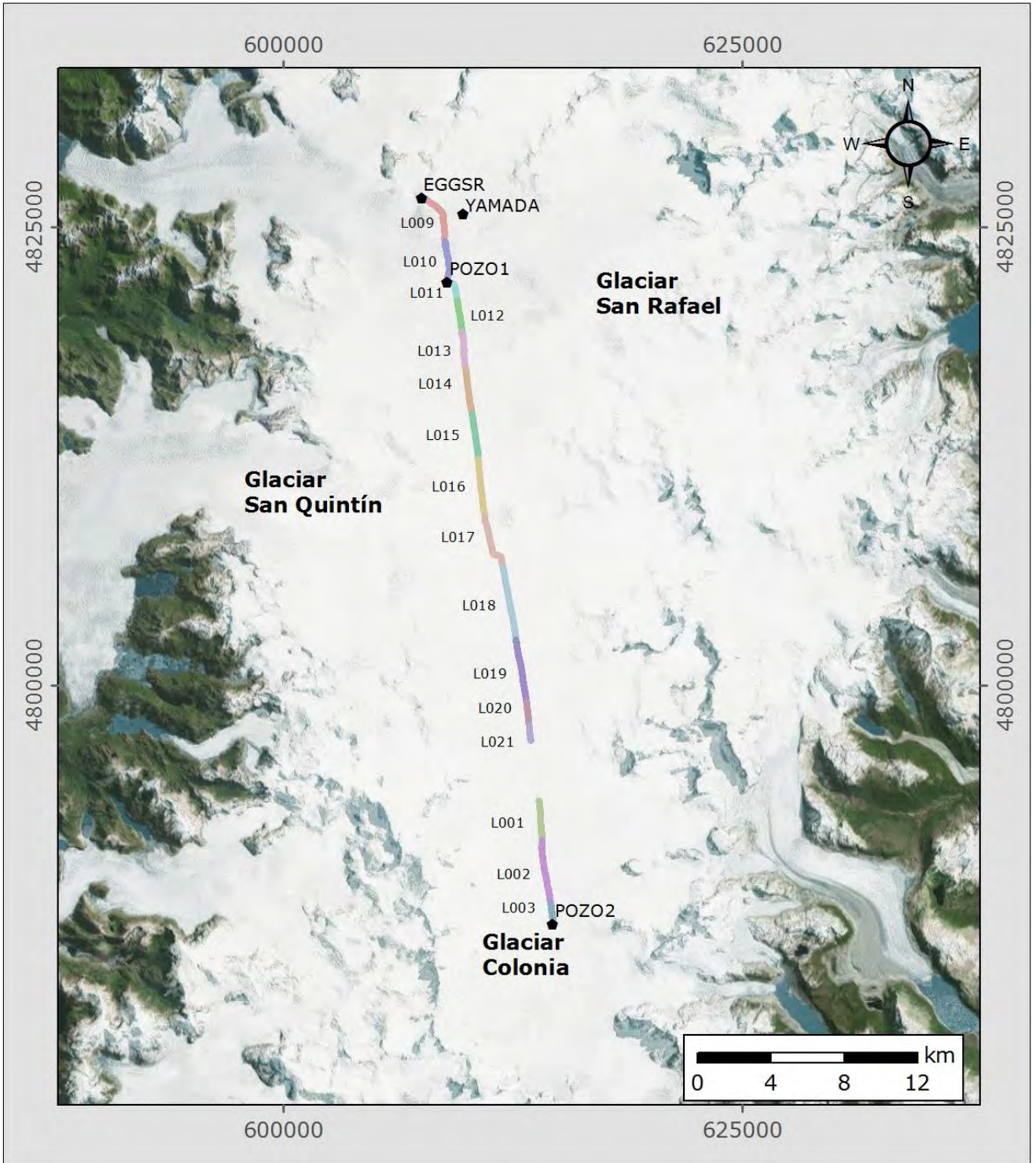


Figura 6.3-A. Perfiles GPR longitudinales de 2014 correspondientes a las Figs. 6.3-B a 6.3-P. "Yamada" representa la posición de la perforación realizada por Yamada (1987).

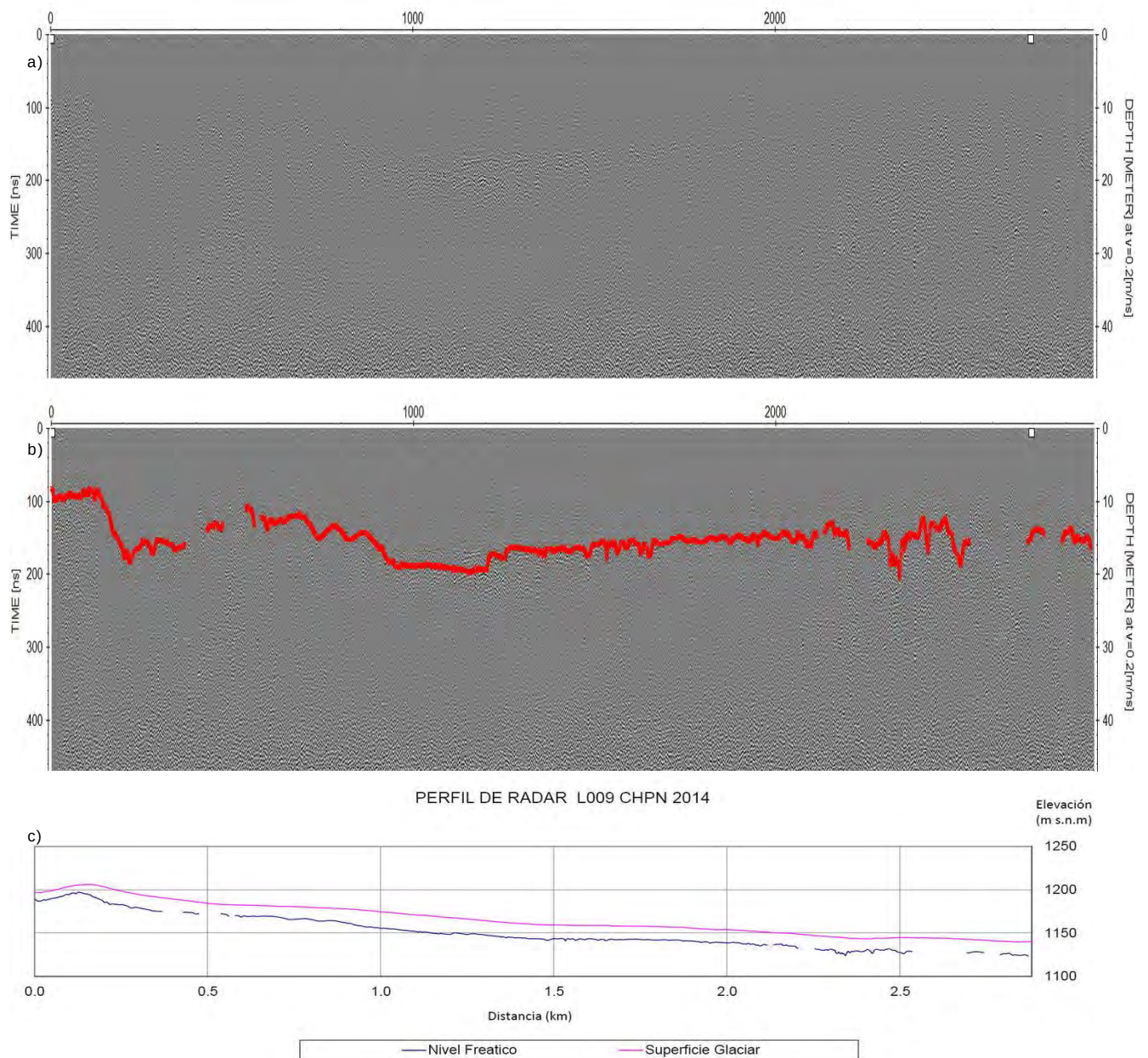


Figura 6.3-B. Perfil Longitudinal L009. Inicio del perfil longitudinal cercano a EGGSR. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

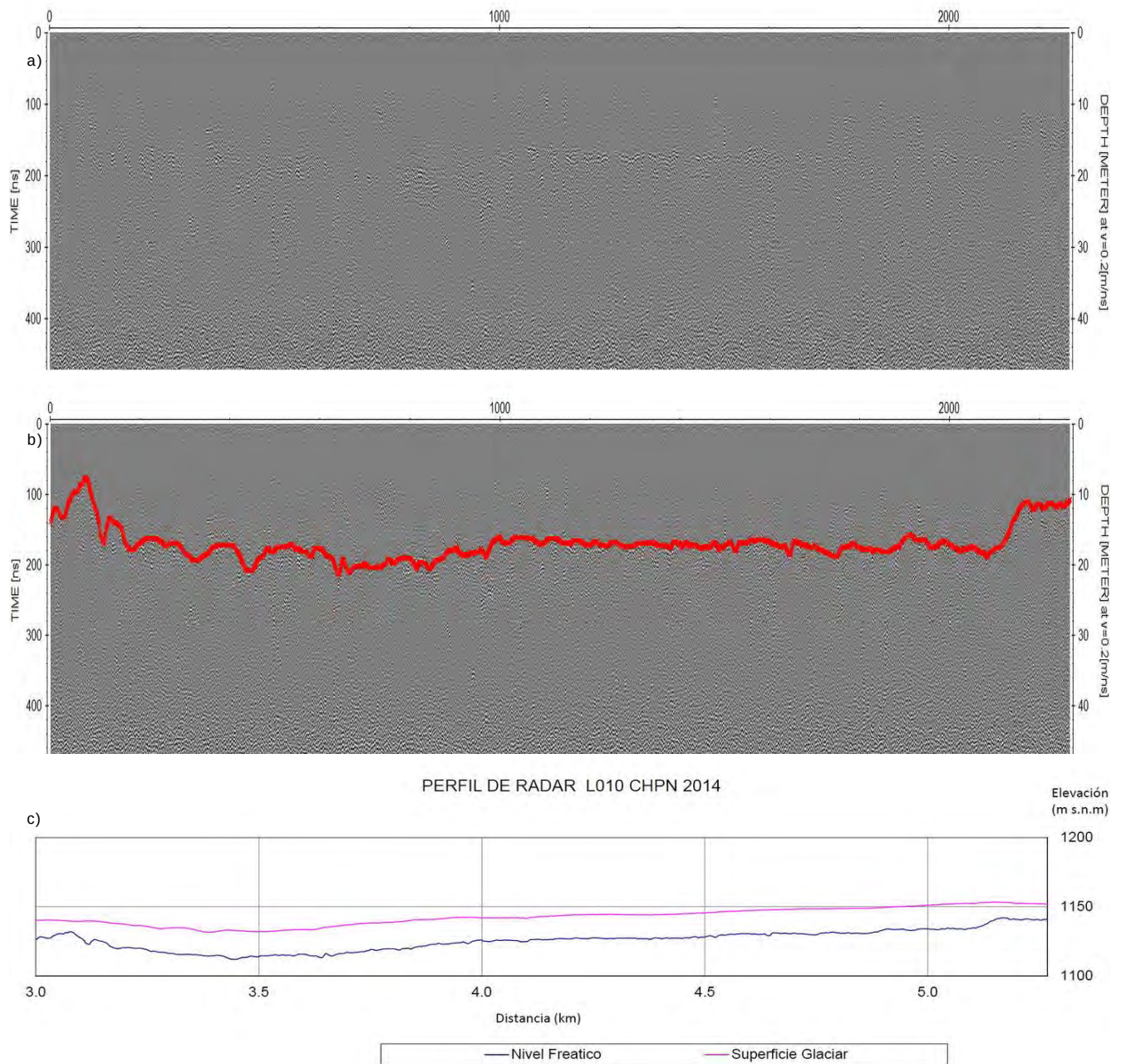


Figura 6.3-C. Perfil Longitudinal L010. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

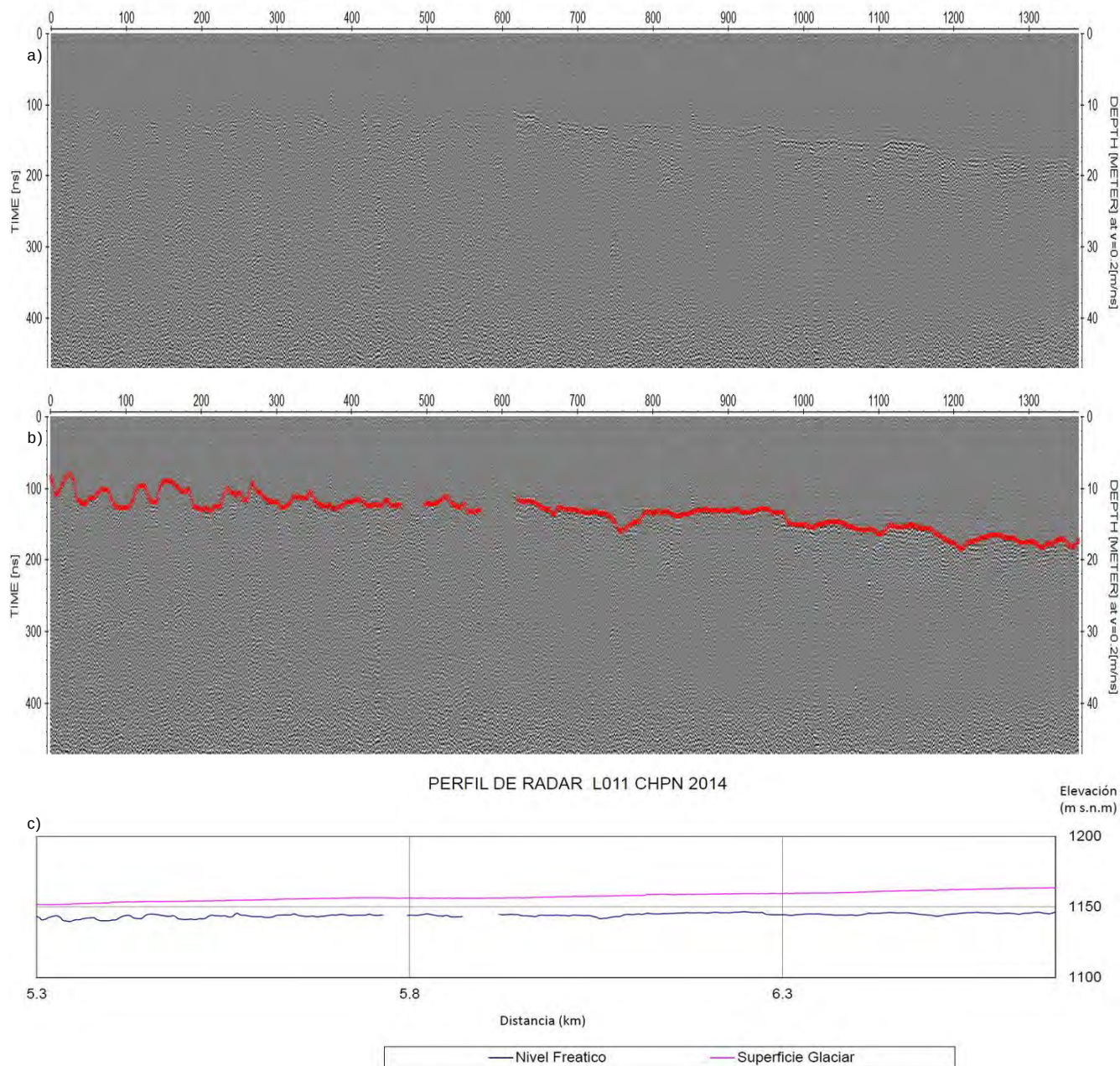


Figura 6.3-D. Perfil Longitudinal L011. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

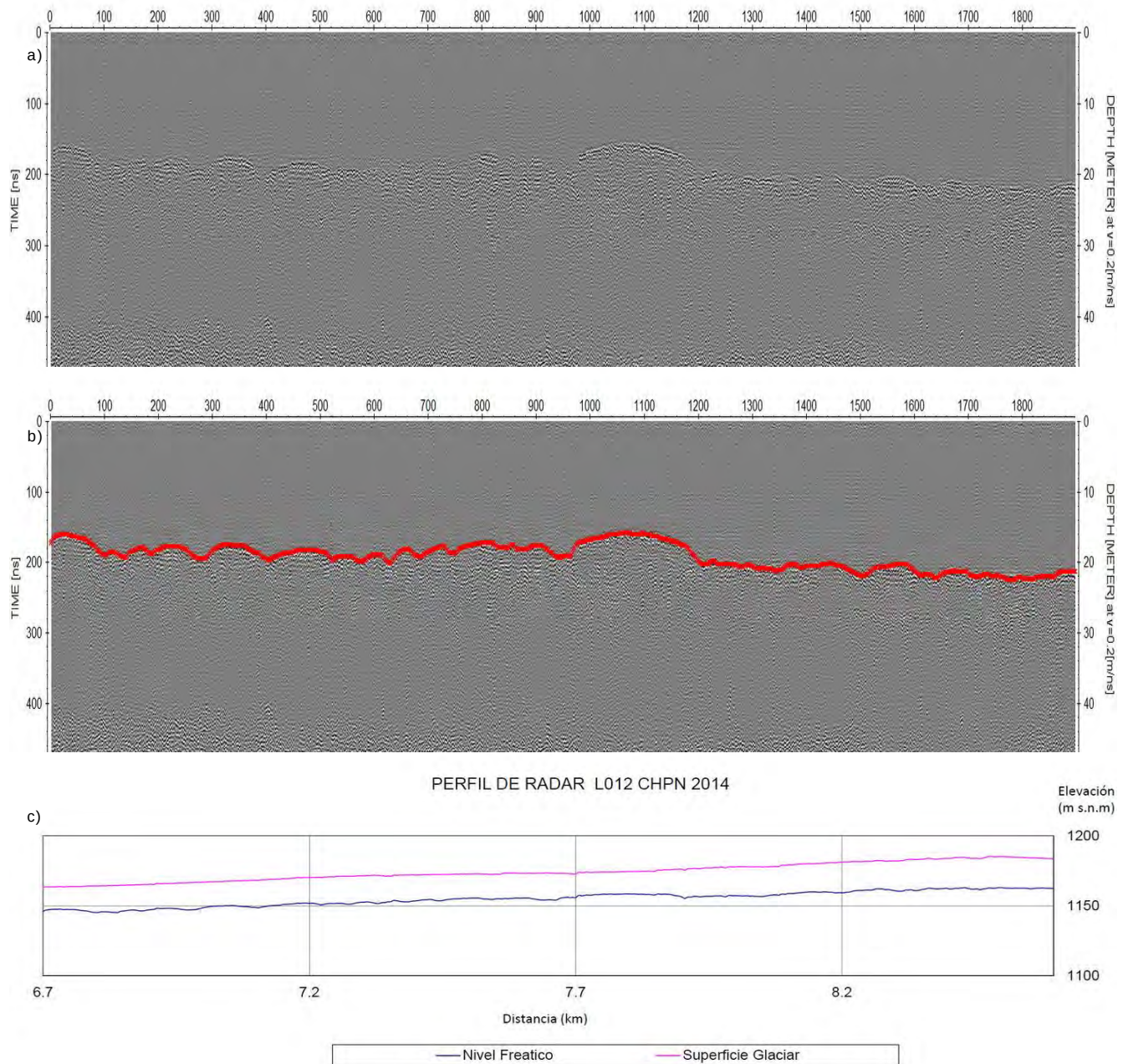


Figura 6.3-E. Perfil Longitudinal L012. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

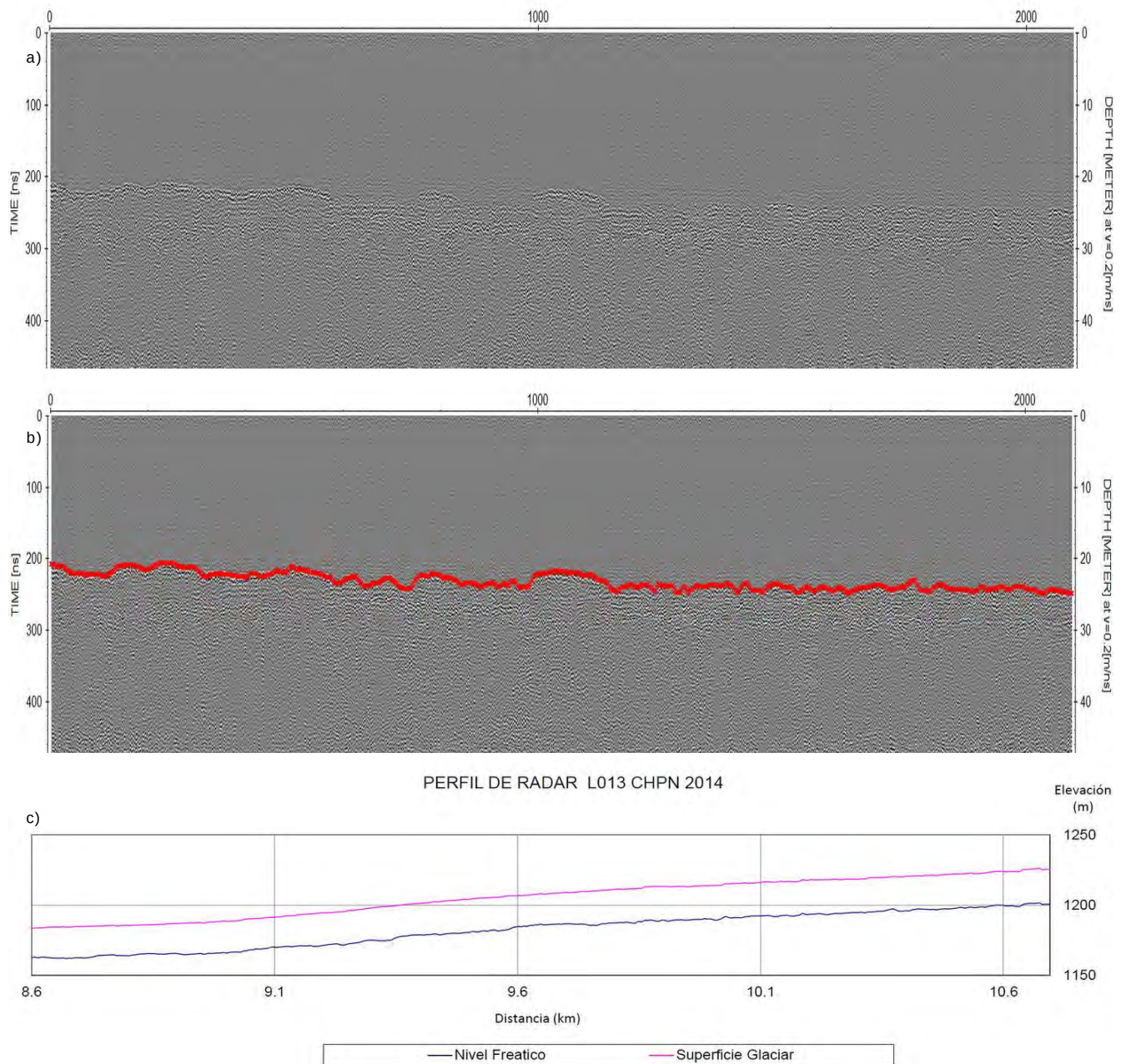


Figura 6.3-F. Perfil Longitudinal L013. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

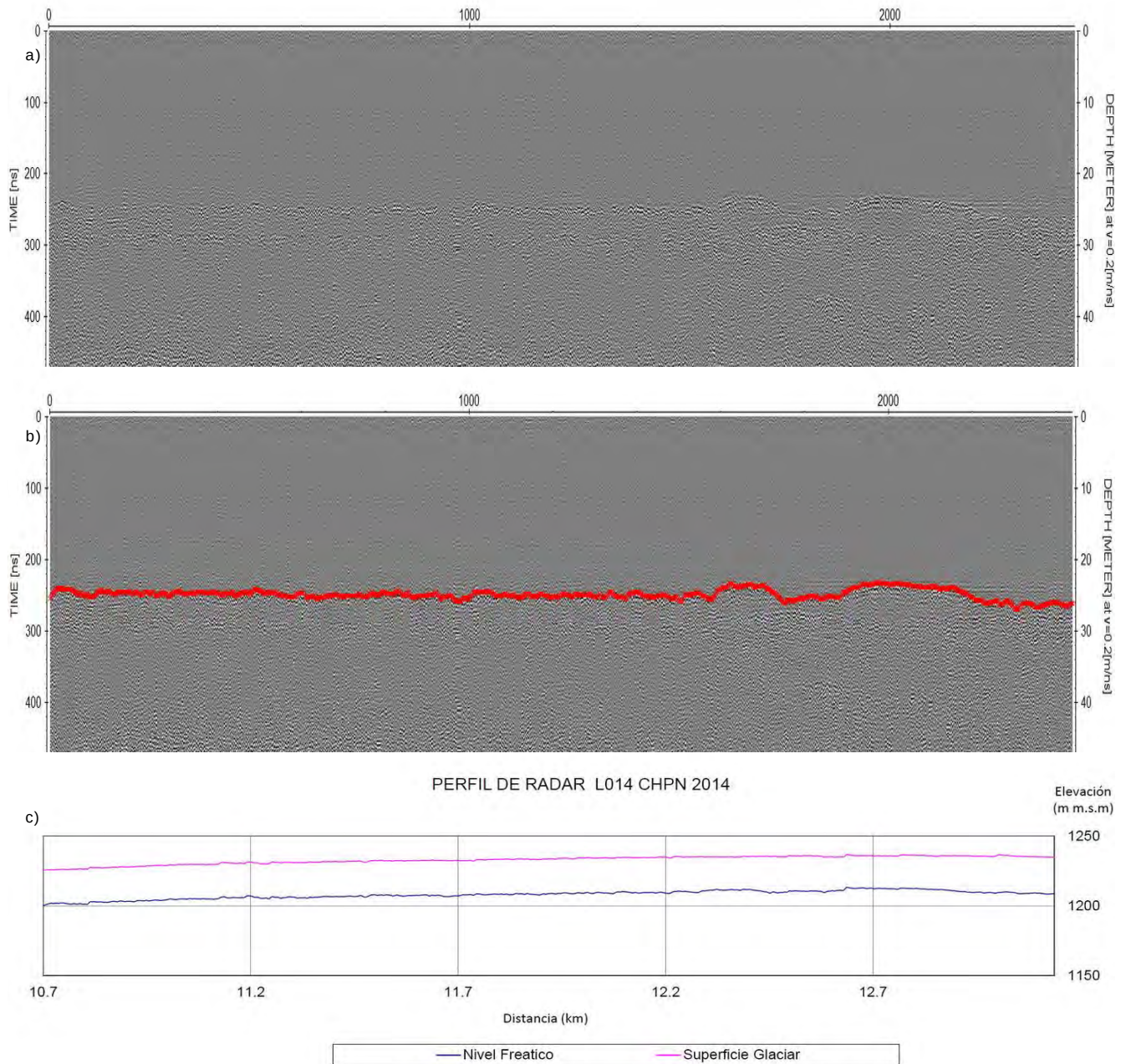


Figura 6.3-G. Perfil Longitudinal L014. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

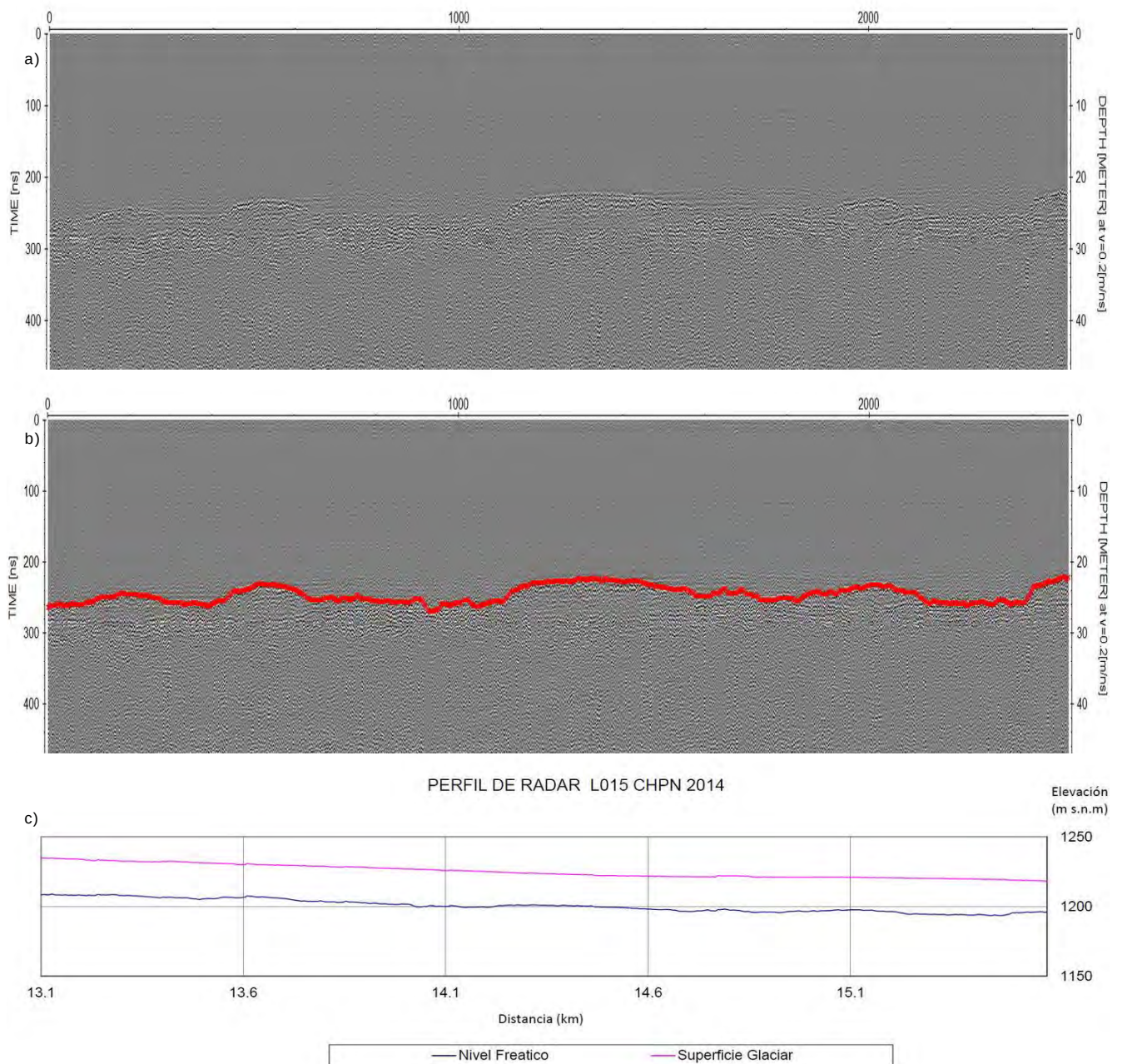


Figura 6.3-H. Perfil Longitudinal L015. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

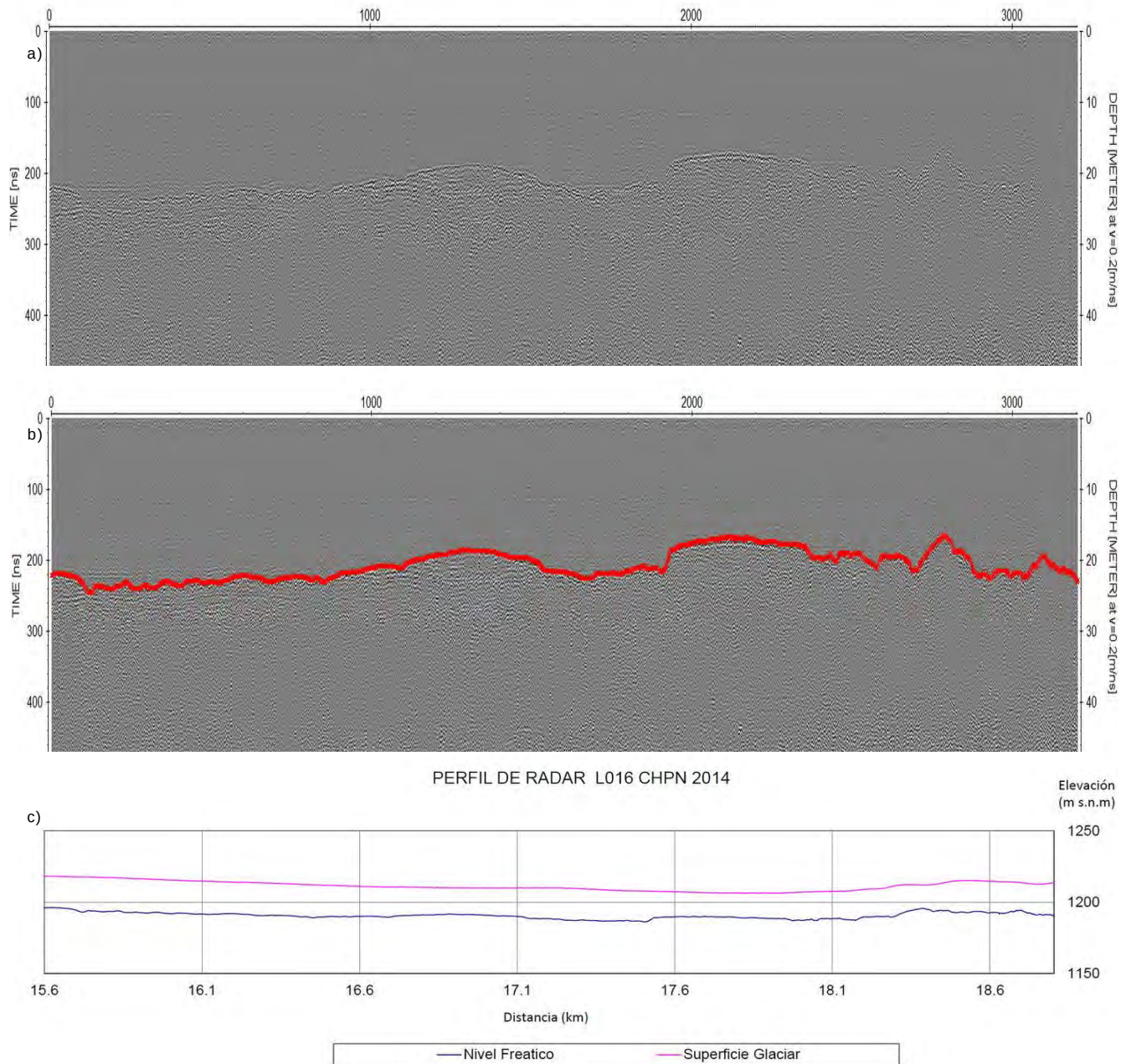


Figura 6.3-I. Perfil Longitudinal L016. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

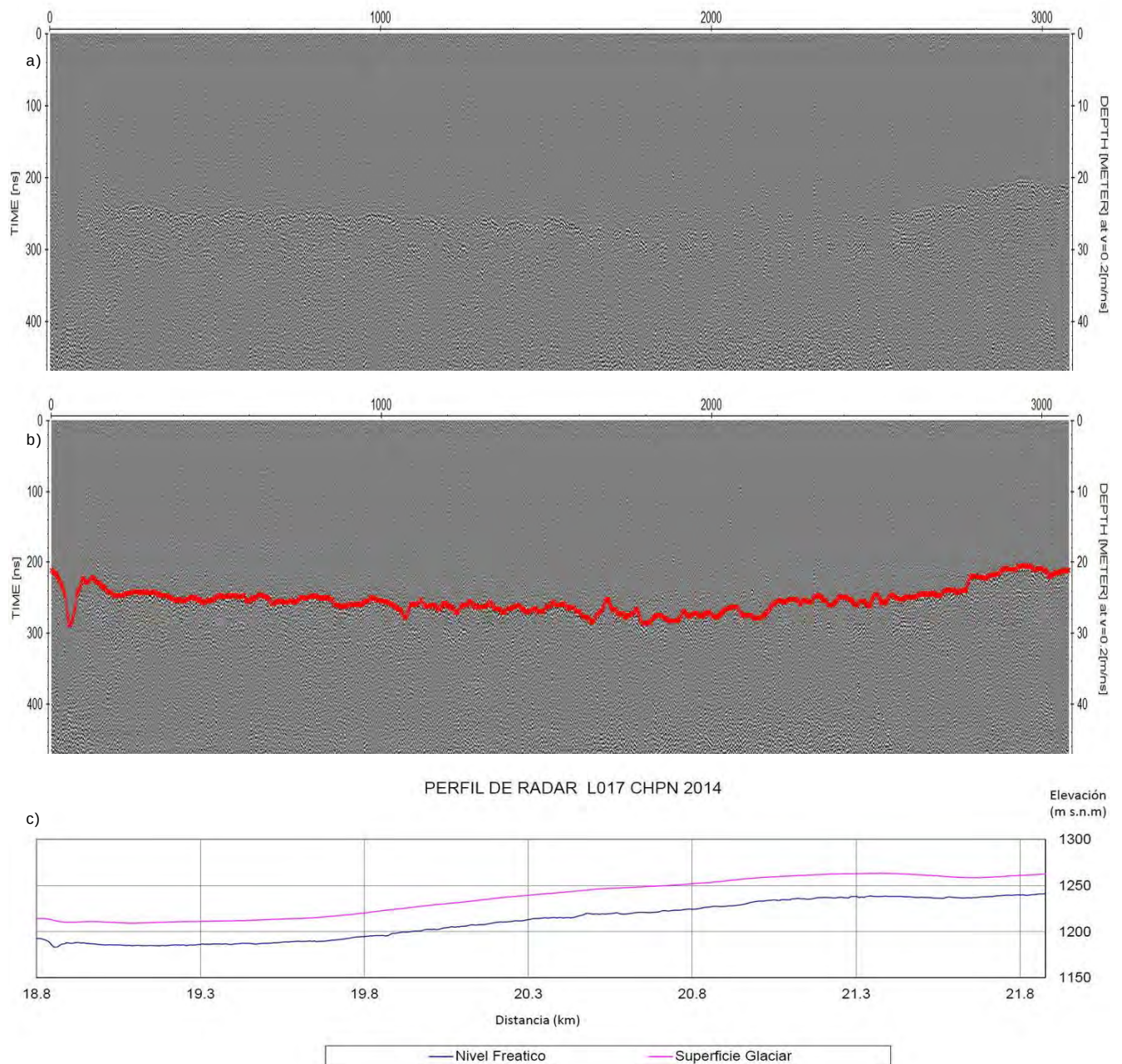


Figura 6.3-J. Perfil Longitudinal L017. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

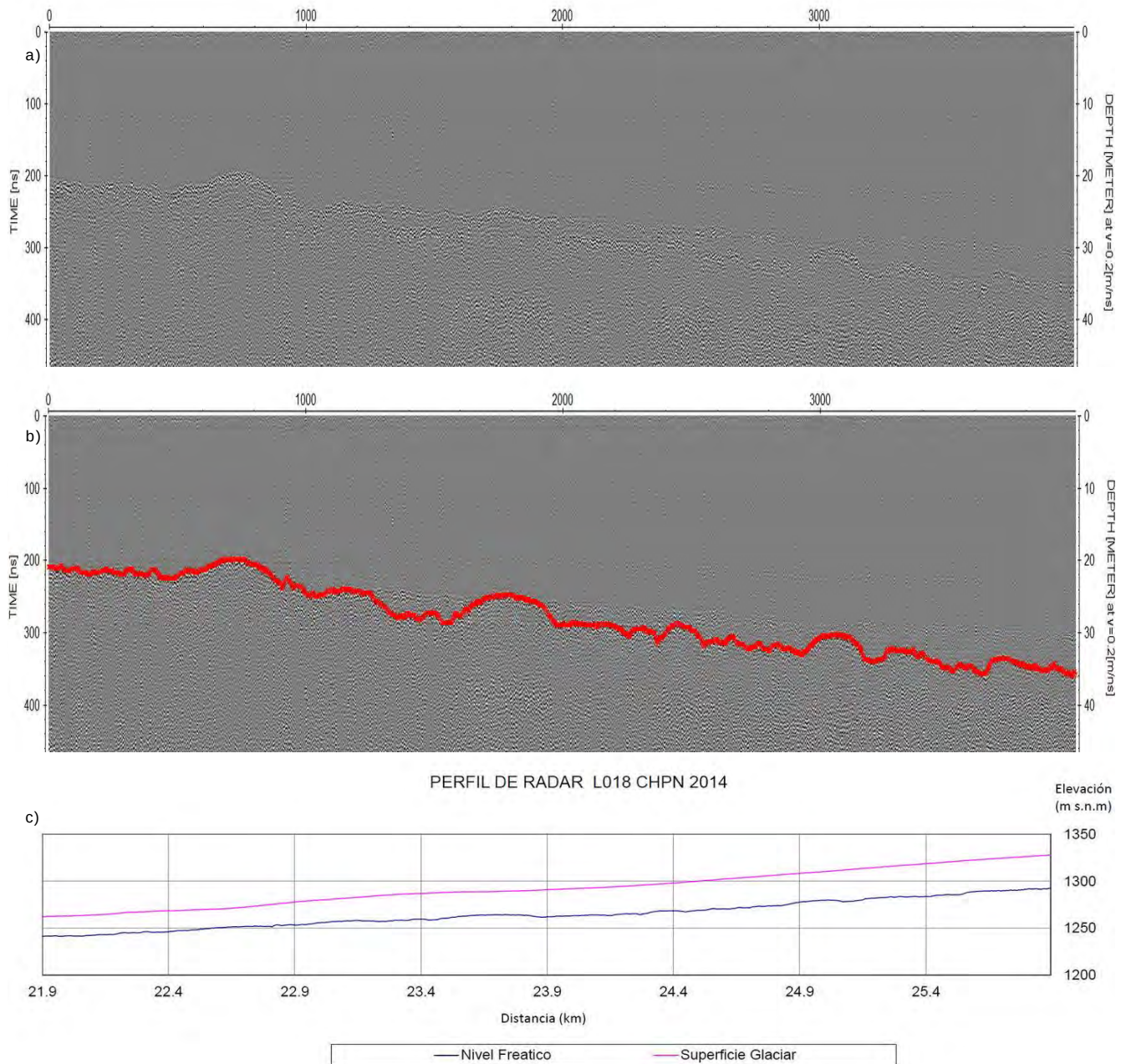


Figura 6.3-K. Perfil Longitudinal L018. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

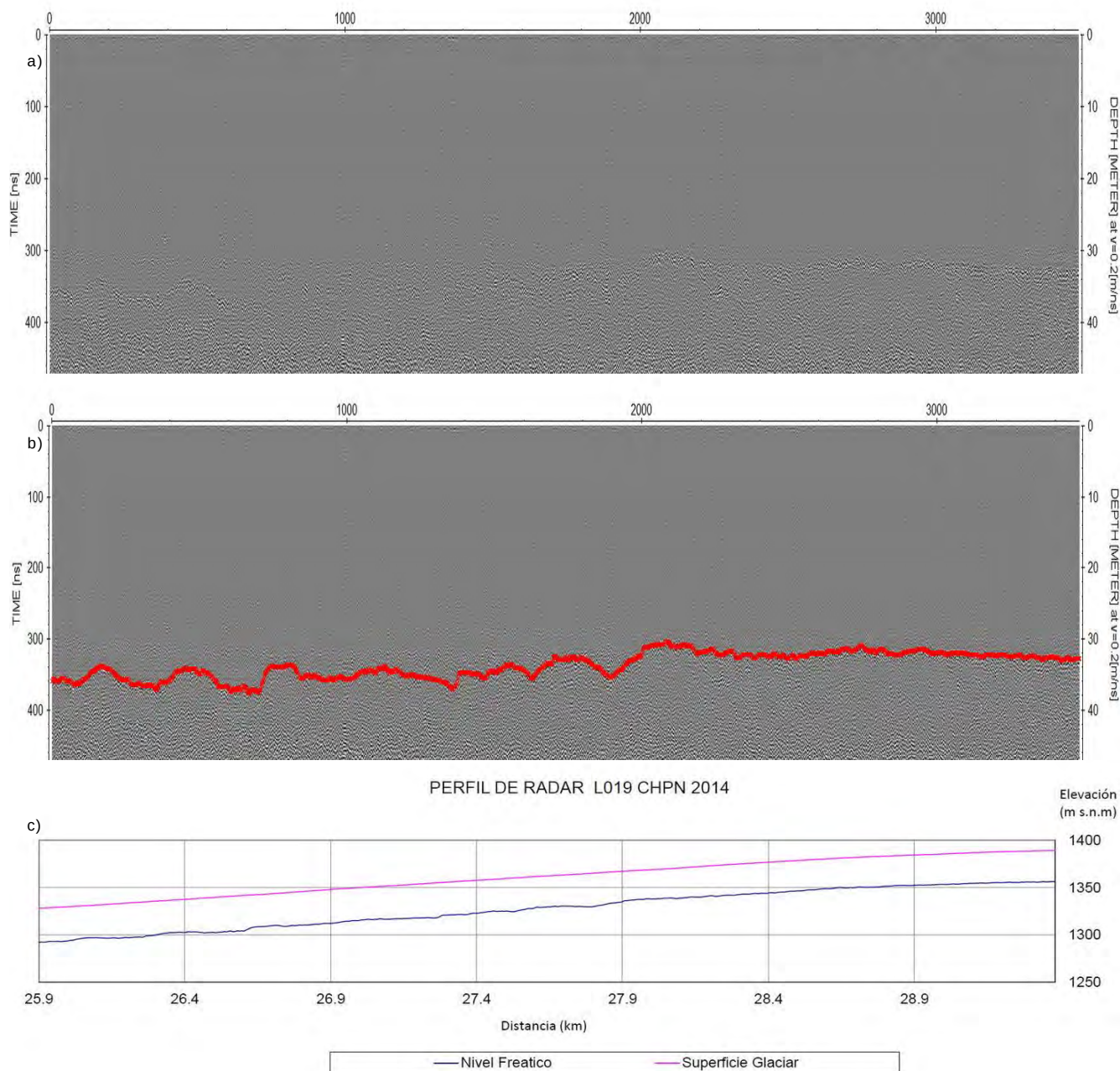


Figura 6.3-L. Perfil Longitudinal L019. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

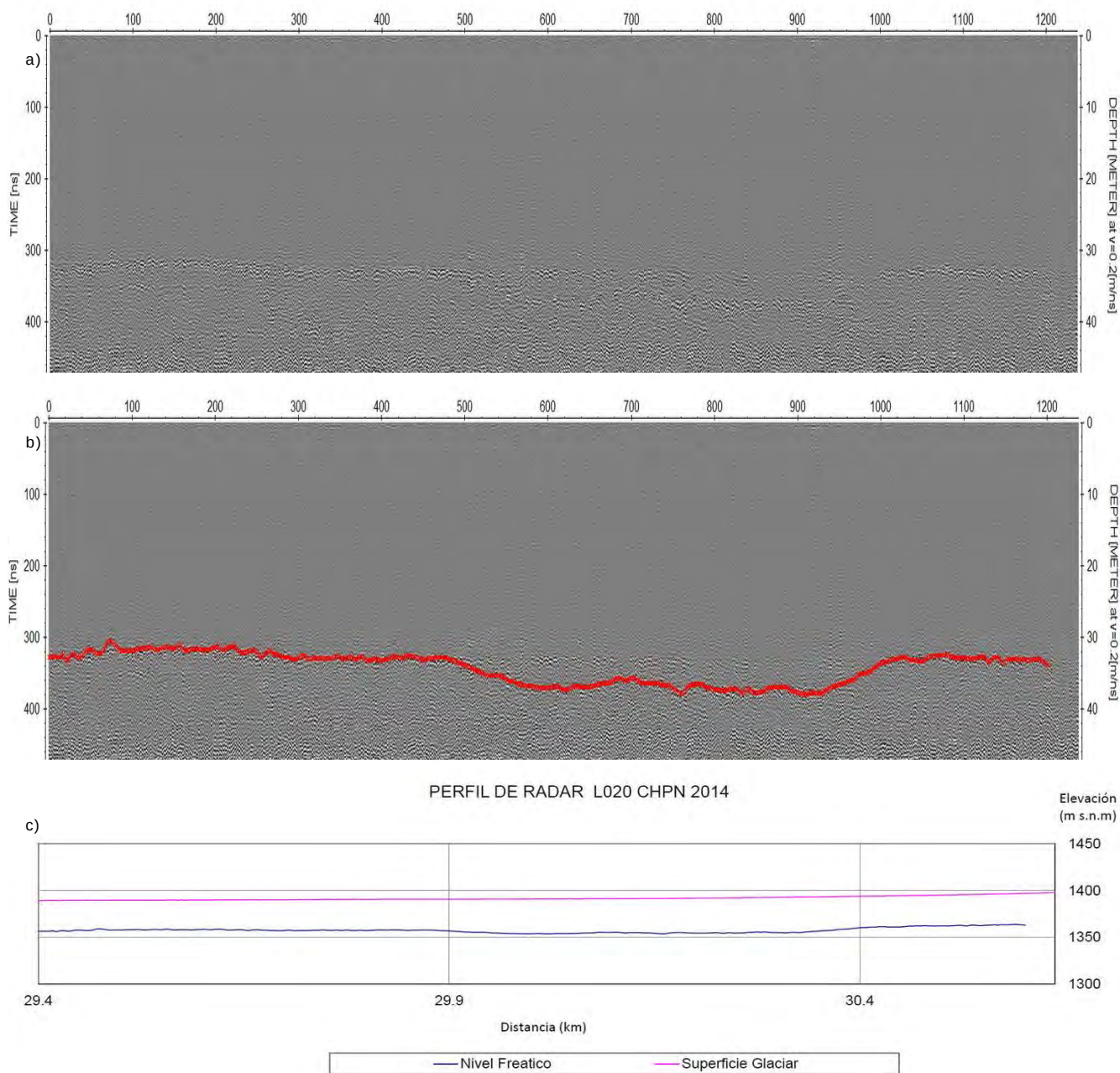


Figura 6.3-M. Perfil Longitudinal L020. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

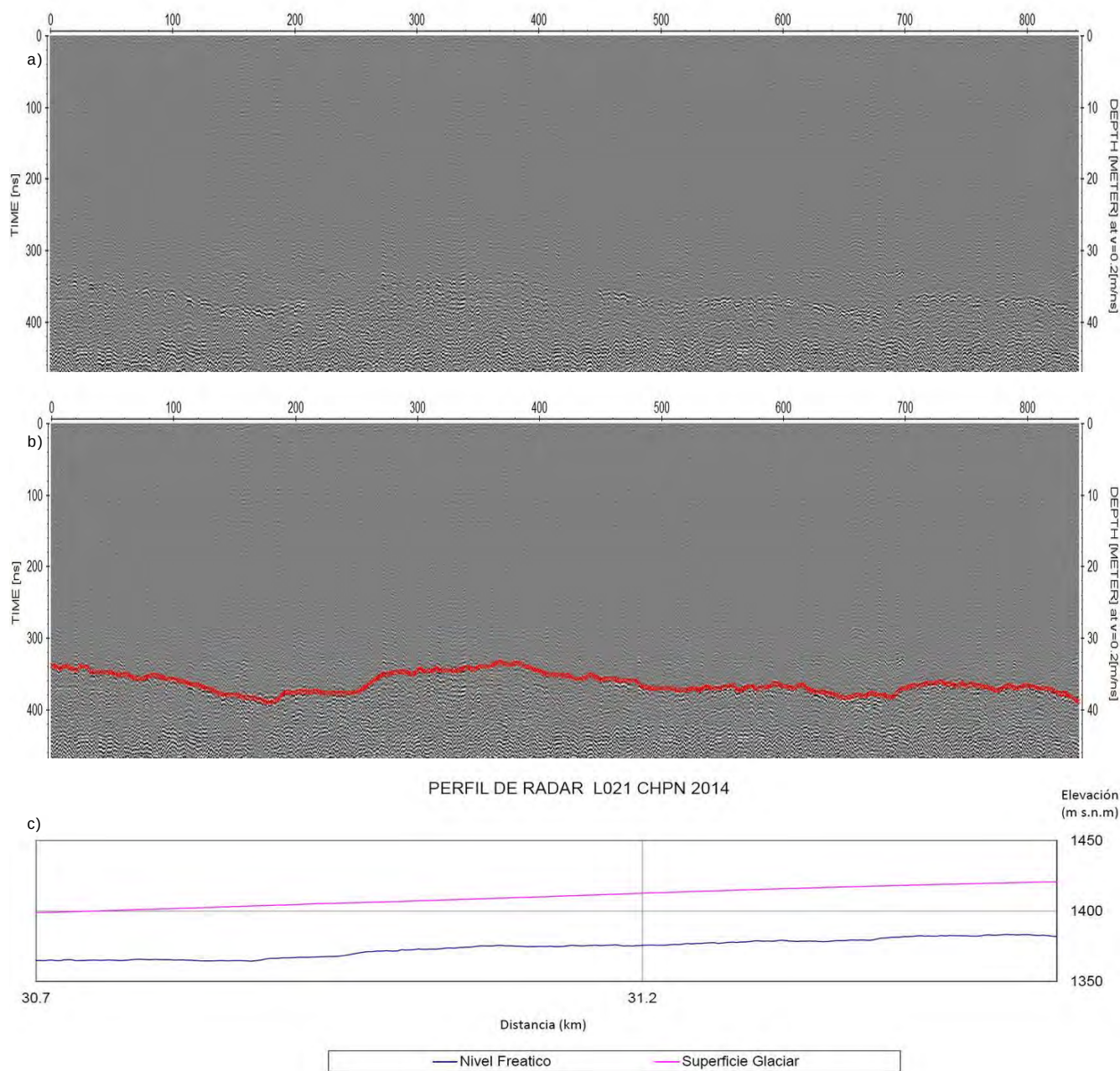


Figura 6.3-N. Perfil Longitudinal L021. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

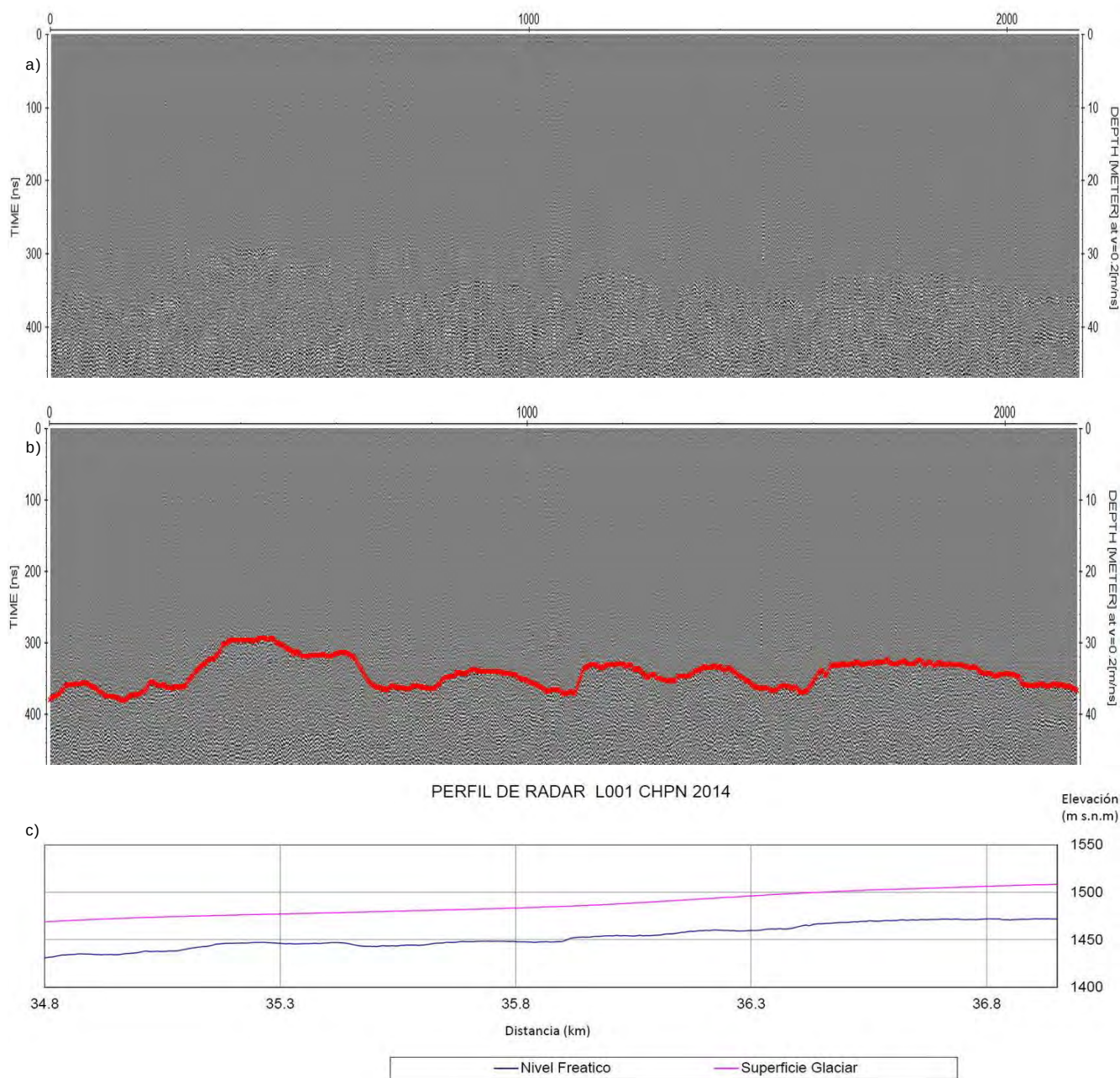


Figura 6.3-O. Perfil Longitudinal L001. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

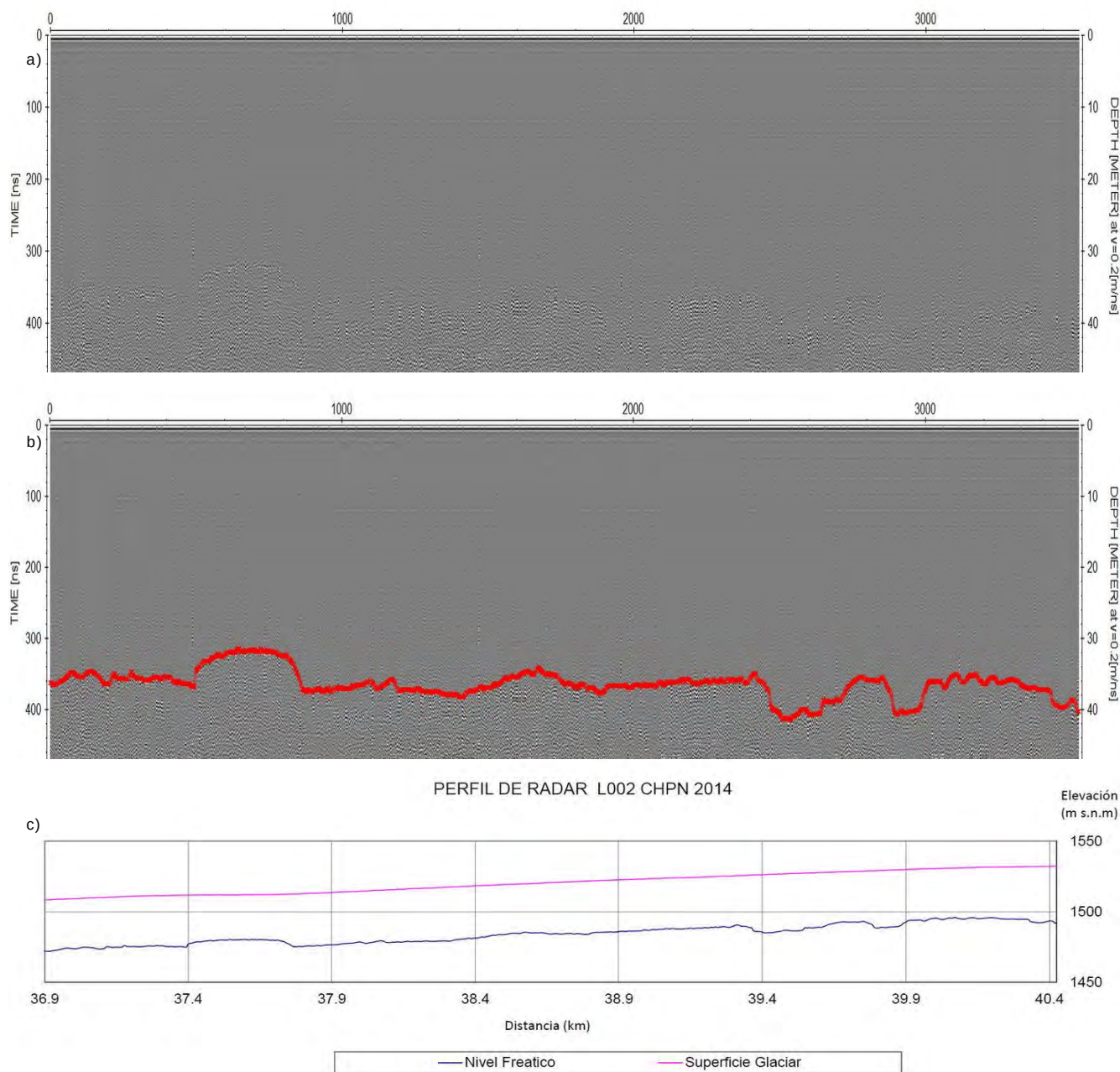


Figura 6.3-P. Perfil Longitudinal L002. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

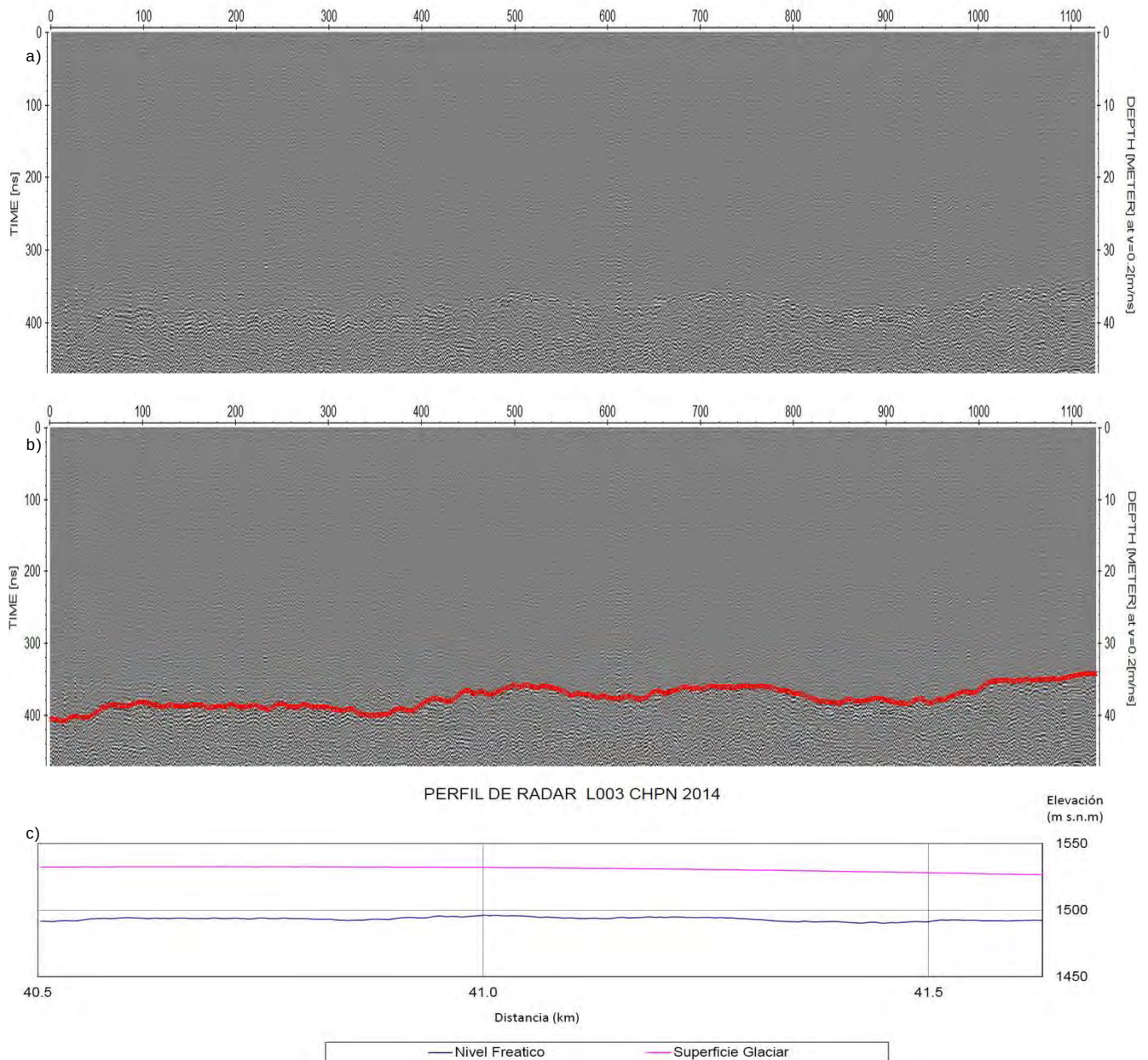


Figura 6.3-Q. Perfil Longitudinal L003. Al final de este perfil se encuentra el Pozo 2. El comienzo del perfil corresponde al extremo izquierdo, el fin es el extremo derecho en las 3 figuras. a) Radargrama superior: datos obtenidos mediante un GPR GSSI SIR3000 de 200 MHz. b) Radargrama medio: la línea roja corresponde a la interpretación del nivel freático, dibujada sobre el radargrama mostrado en a). El eje de abscisas de los radargramas a) y b) representa la distancia recorrida considerando el origen al principio del perfil L001. En los radargramas la superficie se representa plana. c) El gráfico inferior corresponde al perfil con topografía real de la superficie del glaciar (morado) y el nivel freático (azul), con un eje de abscisas que indica la distancia acumulada considerando el origen al inicio del perfil longitudinal L009.

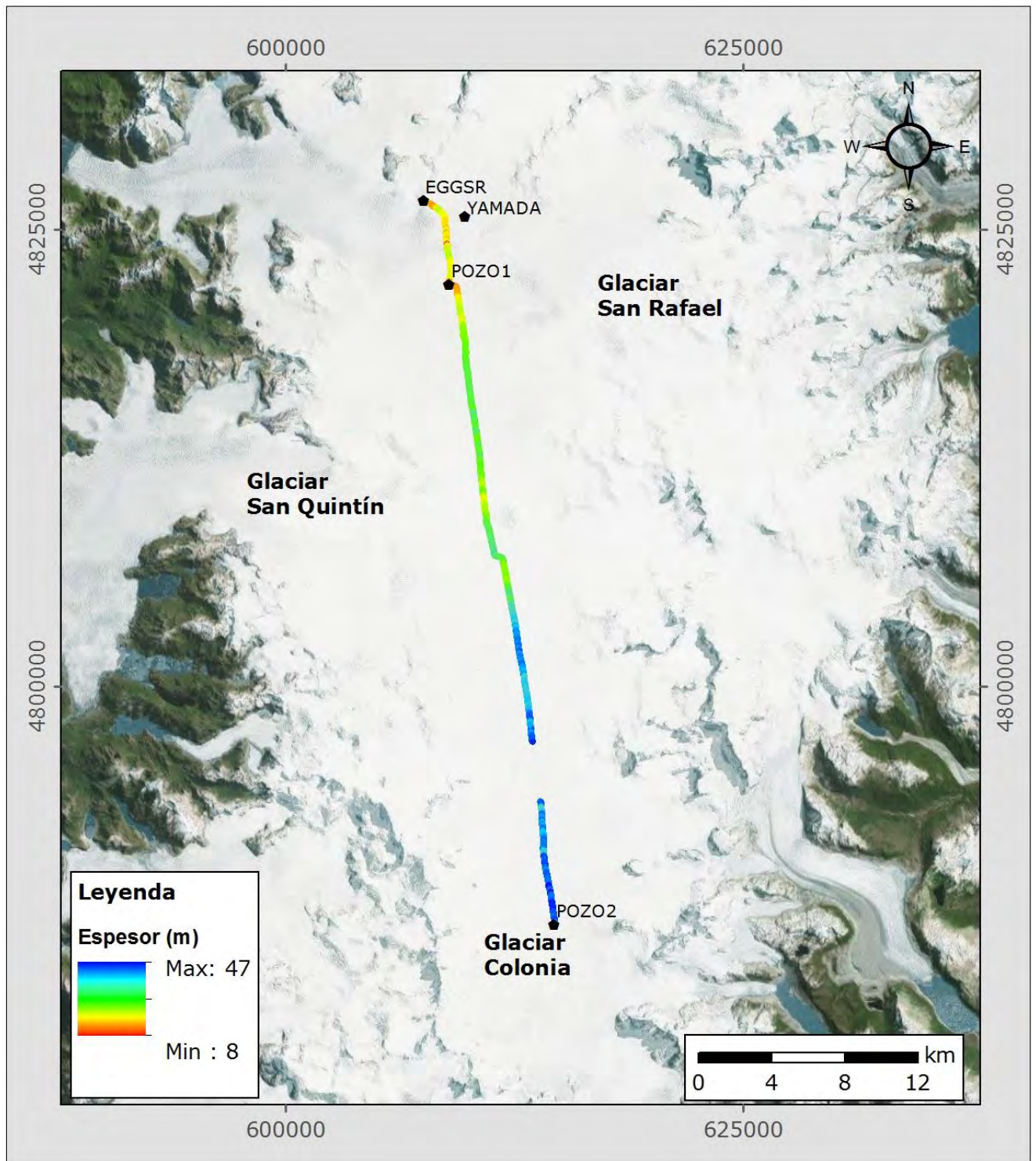


Figura 6.3-R. Profundidad del nivel freático interpretado a partir de los datos GPR de 2014. "Yamada" representa la posición de la perforación realizada por Yamada (1987).

6.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS GPR 2013 Y 2014

Tal como se ha indicado, tanto en 2013 como en 2014 se aprecia claramente la napa freática en los registros GPR. Para ilustrar la naturaleza del reflector que se interpreta como la napa freática, se presentan los datos GPR de 2013 y 2014 en formato de amplitud (diagrama A) en las Figs. 6.4-A y B, respectivamente, que corresponden a un punto común en ambos registros, de coordenadas E 614.659 m y N 4.787.400, a unos 400 m al norte del Pozo 2.

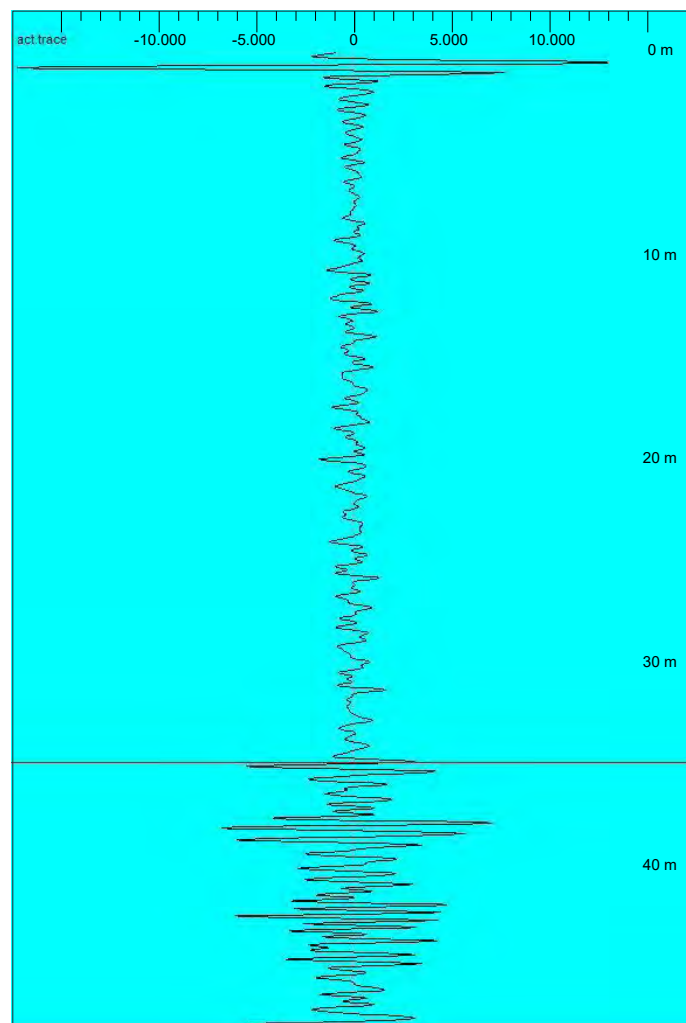


Figura 6.4-A. Diagrama A, archivo L017, traza 13.364 del los datos GPR del año 2013. El tiempo de retorno de la línea horizontal, interpretada como la napa freática, es de 350 ns, equivalente a una profundidad de 35,0 m. La escala de amplitud (eje de abscisas) son valores digitales de 16 bits.

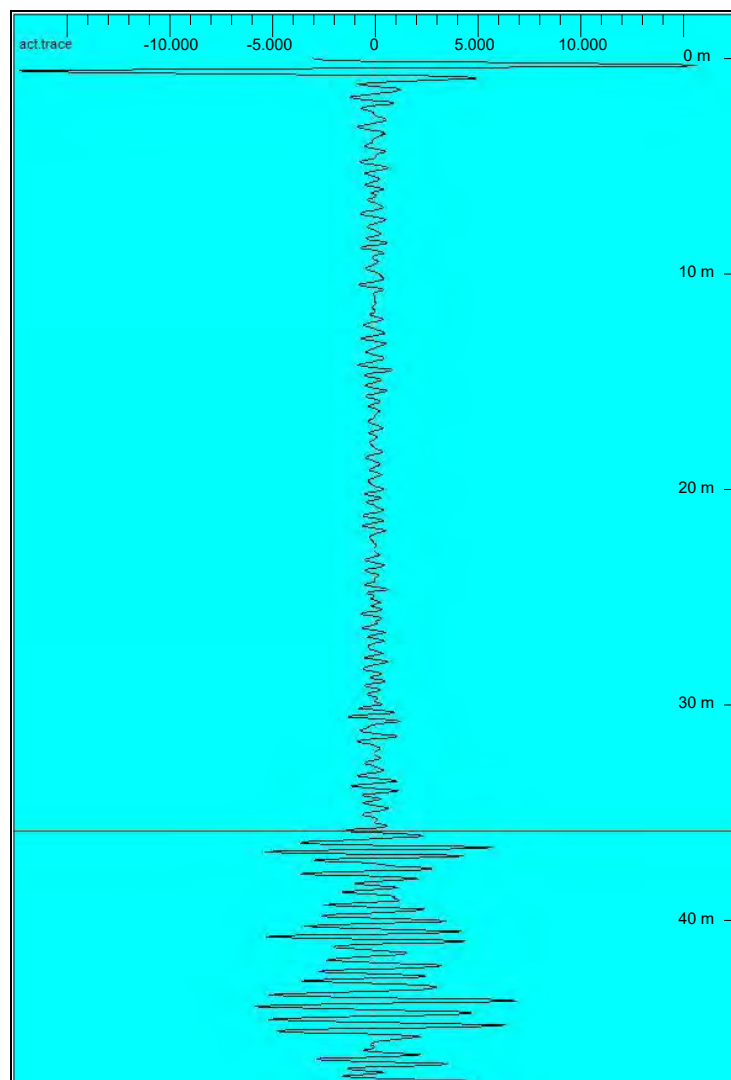


Figura 6.4-B. Diagrama A, archivo L003, traza 5869 de los datos GPR del año 2014. El tiempo de retorno de la línea horizontal, interpretada como la napa freática, es de 363 ns, equivalente a una profundidad de 36.3. La escala de amplitud (eje de abscisas) son valores digitales de 16 bits.

Como se puede apreciar en las Figs. 6.4-A y B, la profundidad determinada para la napa en ambos años es prácticamente igual, de 35,0 m en 2013 y 36.6 m en 2014. Sin embargo, en 2013 la amplitud del reflector correspondiente a la napa era del orden de un 20% mayor a la amplitud detectada en 2014 (Tabla 6.4-A). Efectivamente en prácticamente todos los registros de radar de 2013 la napa se detecta en forma más clara respecto de 2014. Ello puede deberse al hecho que la nieve superficial en 2014 era más densa que en 2013 (sección 7.1.4), dificultando por consiguiente la penetración de

la onda electromagnética en 2014 respecto de 2013.

Tabla 6.4-A. Amplitudes correspondientes al reflector de la napa freática obtenidas de los diagramas A de las Figs. 6.4-A y B. Las unidades de la amplitud son adimensionales, con una resolución de 16 bits, vale decir un rango entre -32.768 y +32.768, en total 65.536 unidades.

GPR			Amplitud en la napa		Amplitud máxima		Amplitud media
Campaña	Archivo	Traza	(+)	(-)	(+)	(-)	
2013	L017	13.364	3.398	5.646	7.411	6.755	3.200
2014	L003	5.869	4.778	3.181	5.788	4.479	2.700

En la Fig. 6.4-C y D se muestran los perfiles longitudinales de las temporadas 2013 y 2014, y la comparación de los perfiles longitudinales entre ellos. A pesar que no es posible superponer ambos perfiles exactamente en la misma posición, se observa por lo general una buena coincidencia, con valores de profundidad de la napa que oscilan entre 7 y 42 m. Esto indica que la profundidad de la napa freática es relativamente constante en el tiempo, lo cual no es sorprendente pues está determinada por los factores que condicionan el derretimiento en superficie (ver 5. Balance de Energía y Meteorología), por la acumulación de nieve y por la profundidad de la transición neviza-hielo que constituye un nivel relativamente impermeable sobre el cual se sitúa la napa freática.

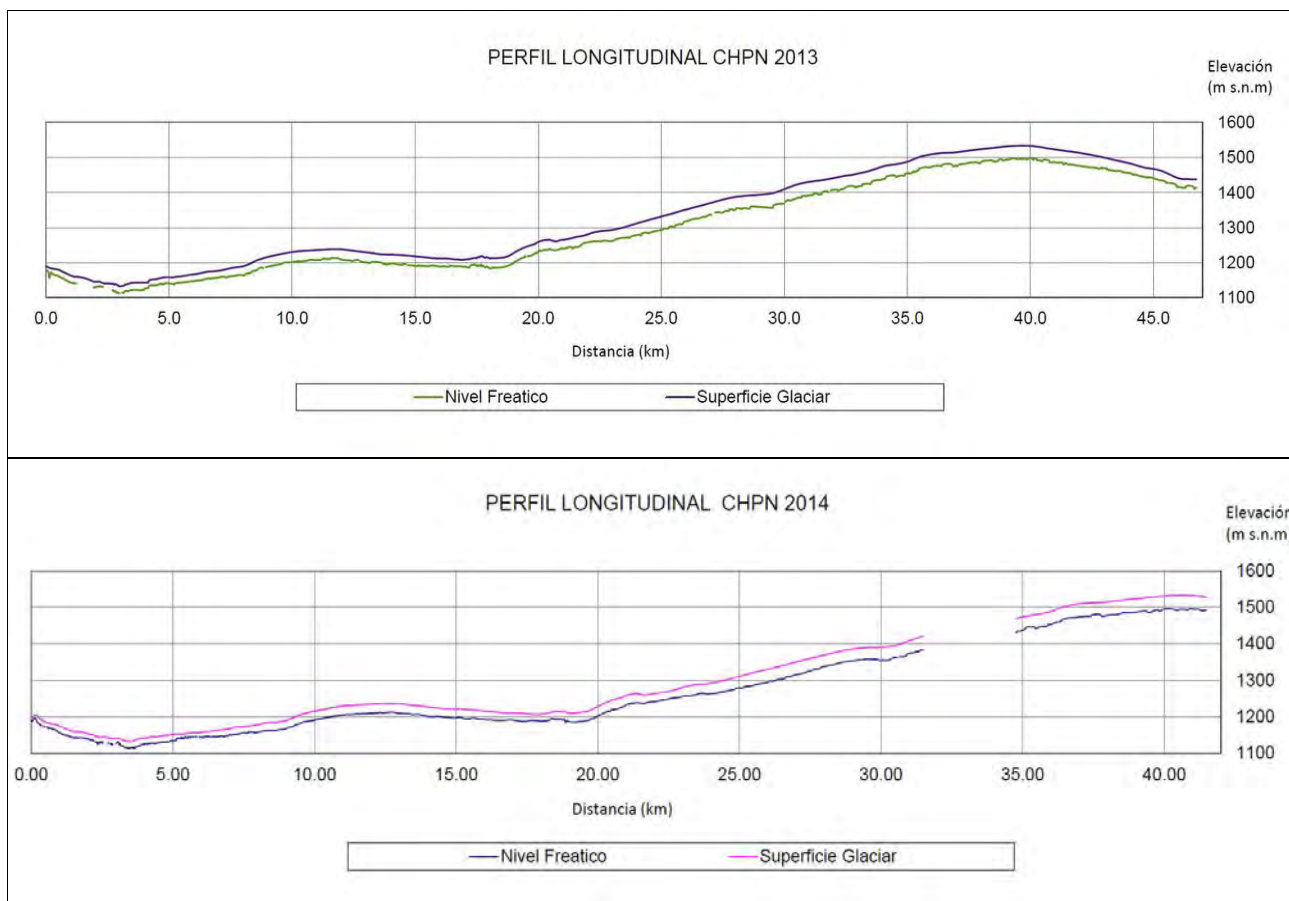


Figura 6.4-C. De arriba hacia abajo perfiles GPR longitudinales de los años 2013 y 2014

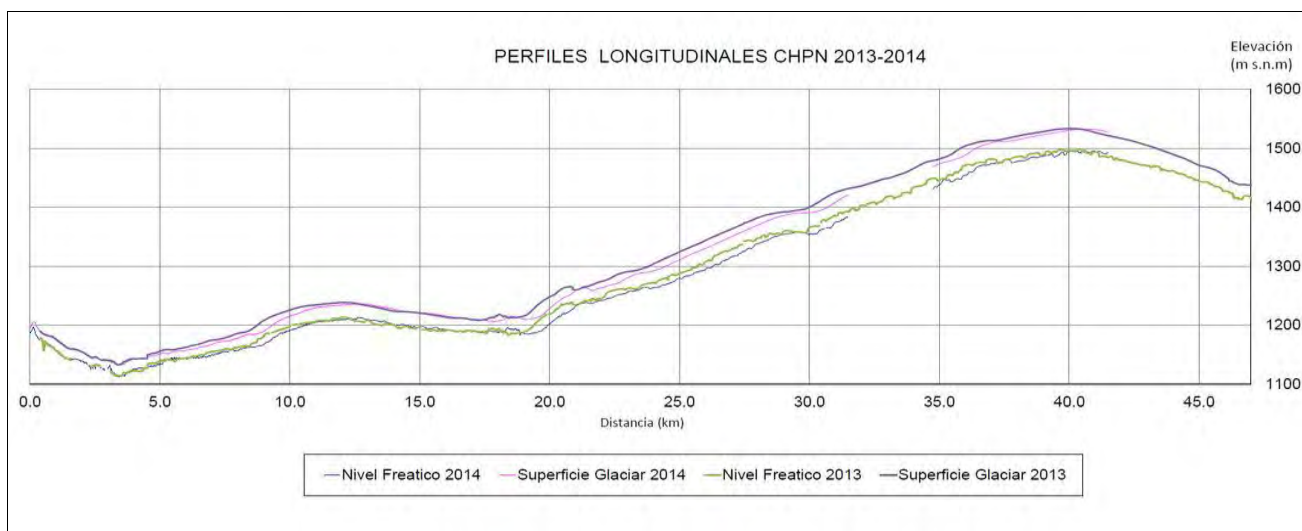


Fig. 6.4-D. Comparación de los perfiles longitudinales de CHPN en las temporadas 2013 y 2014.

6.5. DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE LA NAPA FREÁTICA EN LA MESETA CENTRAL DEL CHPN

Se determinó el nivel de la napa freática sobre la meseta central del Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN) (Fig. 6.5-A), a partir de datos de espesores de radar, la altitud y pendientes de la topografía del terreno (modelo digital de terreno (DEM) SRTM).

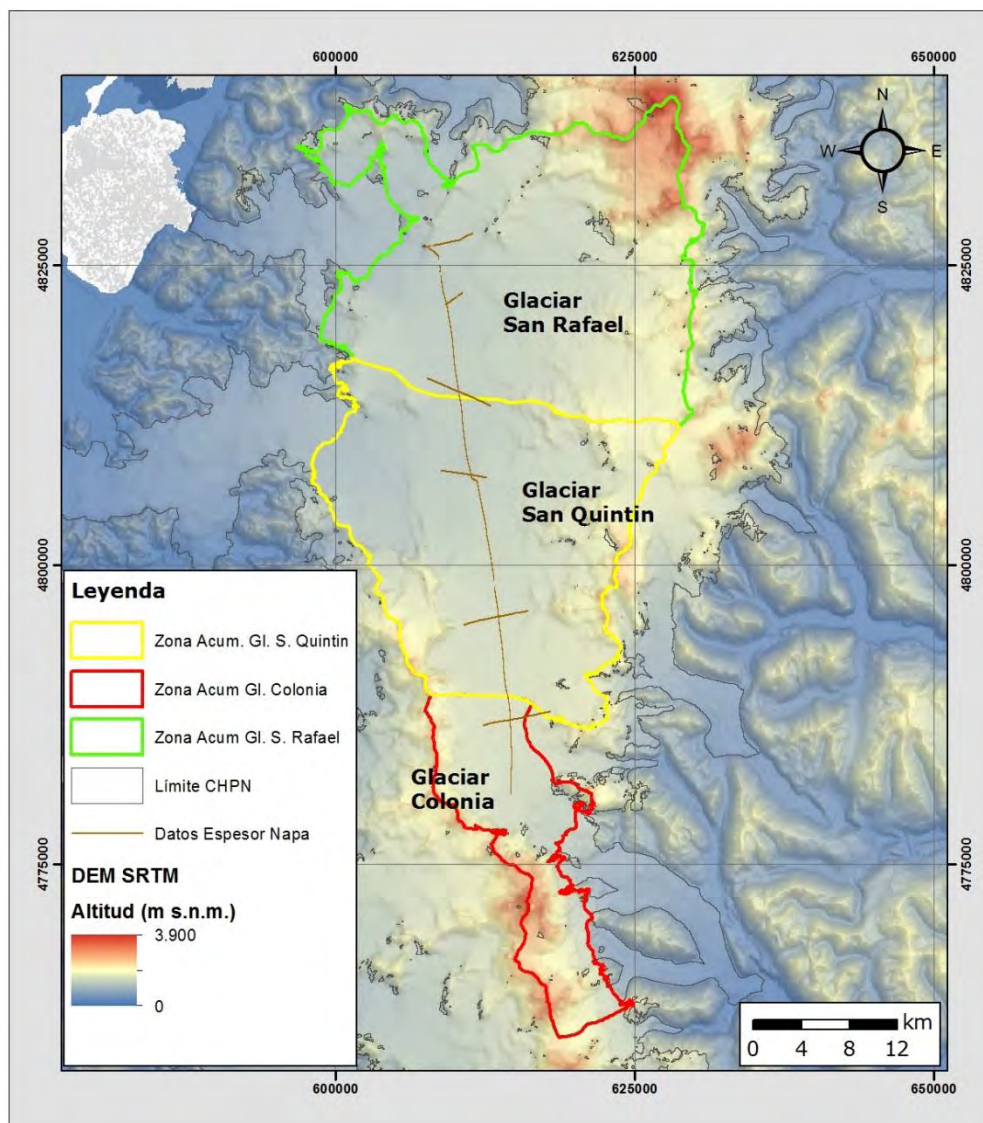


Figura 6.5-A. Área de estudio y datos utilizados para la determinación del nivel freático sobre la meseta central del CHPN.

6.5.1. Metodología

Se determinó la profundidad del nivel freático en la meseta central del CHPN, correspondiente a la zona de acumulación de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia (Figura 6.5-A). Para esto se utilizaron datos de profundidad de la napa freática medidos con radar, los datos de elevación registrados con DGPS simultáneamente con los datos de radar, la altitud y la pendiente derivadas del DEM SRTM.

Se ajustó una ecuación sigmoïdal a los valores de profundidad de la napa freática y su respectiva elevación;

$$y = D + BL \max \left(1 - \frac{x^n}{K^n + x^n} \right)$$

Dónde: BL_{max} = El rango de valores y que toma la curva.

K = El valor de x en la mediana de y .

n = Pendiente de la curva.

D = El mínimo valor en y .

x = Elevación del terreno.

y = Profundidad de la napa freática.

Para mejorar la distribución espacial de los datos, se agregó un valor de profundidad de la napa freática de 0 m a la curva de nivel correspondiente a la ELA (altura de la línea de equilibrio) de cada glaciar y un valor máximo de 50 m de profundidad en la cota de 1800 m s.n.m. El valor de 50 m es el valor máximo detectado de la napa freática a partir de los datos de radar. Con esto se acotan las condiciones de borde del problema, indispensables para una adecuada interpolación, y se asegura que las profundidades medidas estén en un rango de valores que se ajuste razonablemente con la realidad dentro del área de estudio.

Posteriormente se aplicó la función obtenida basado en el DEM SRTM, descartando las pendientes superiores a 2% donde se estima que la napa tendría probablemente una profundidad somera producto del mayor escurrimiento por gravedad.

6.5.2. Resultados

A continuación se presentan los resultados de la determinación de la profundidad del nivel freático en la meseta central del CHPN, obtenidos a partir de los datos de radar disponibles de 2013 (Fig. 6.5.2-A), interpolados mediante un algoritmo basado en la ecuación sigmoideal como se indicó en 6.5.1. Los resultados se resumen en la Tabla 6.5.2-A y se presentan en forma de mapas e histogramas (Figs. 6.5.2-A a F).

En el Anexo 1 se presenta un resumen de los resultados del ajuste de la ecuación sigmoideal realizado con el programa XLfit, para los datos de profundidad del nivel freático en los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia.

La resolución espacial de los resultados corresponde a la del DEM SRTM, que para esta latitud alcanza los 60 m x 90 m aproximadamente. Para fines prácticos se modificó la forma rectangular de la grilla a una cuadrada con tamaño de 60 m x 60 m.

Tabla 6.5.2-A. Datos disponibles de profundidad de nivel freático en CHPN.

Glaciar	Mín.	Máx.	Media	Desv. est.	Nº datos
	m	m	m	m	
San Rafael	9,1	30,2	22,5	4,6	20.951
San Quintín	18,1	41,3	31,2	5,5	35.024
Colonia	18,5	40,6	32,9	5,0	11.638

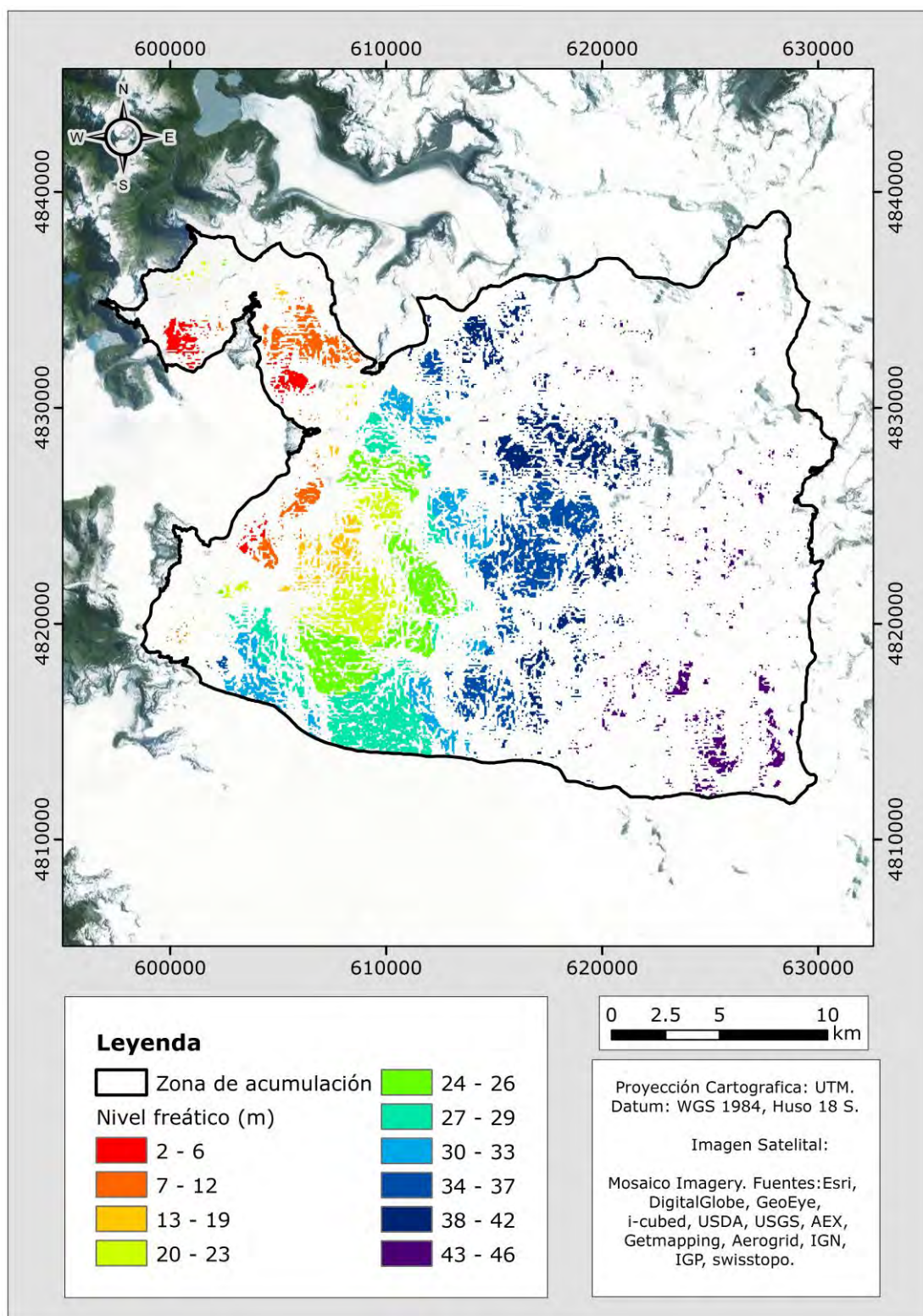


Figura 6.5.2-A. Resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Rafael.

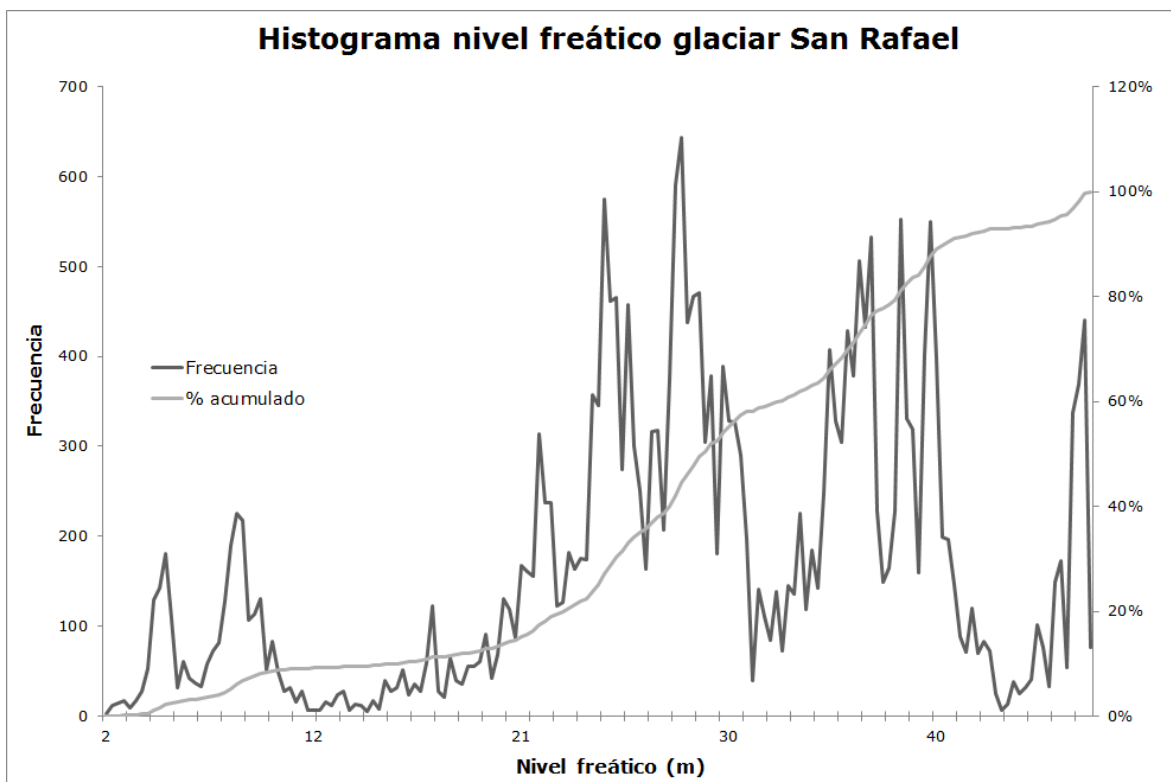


Figura 6.5.2-B. Histograma de resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Rafael.

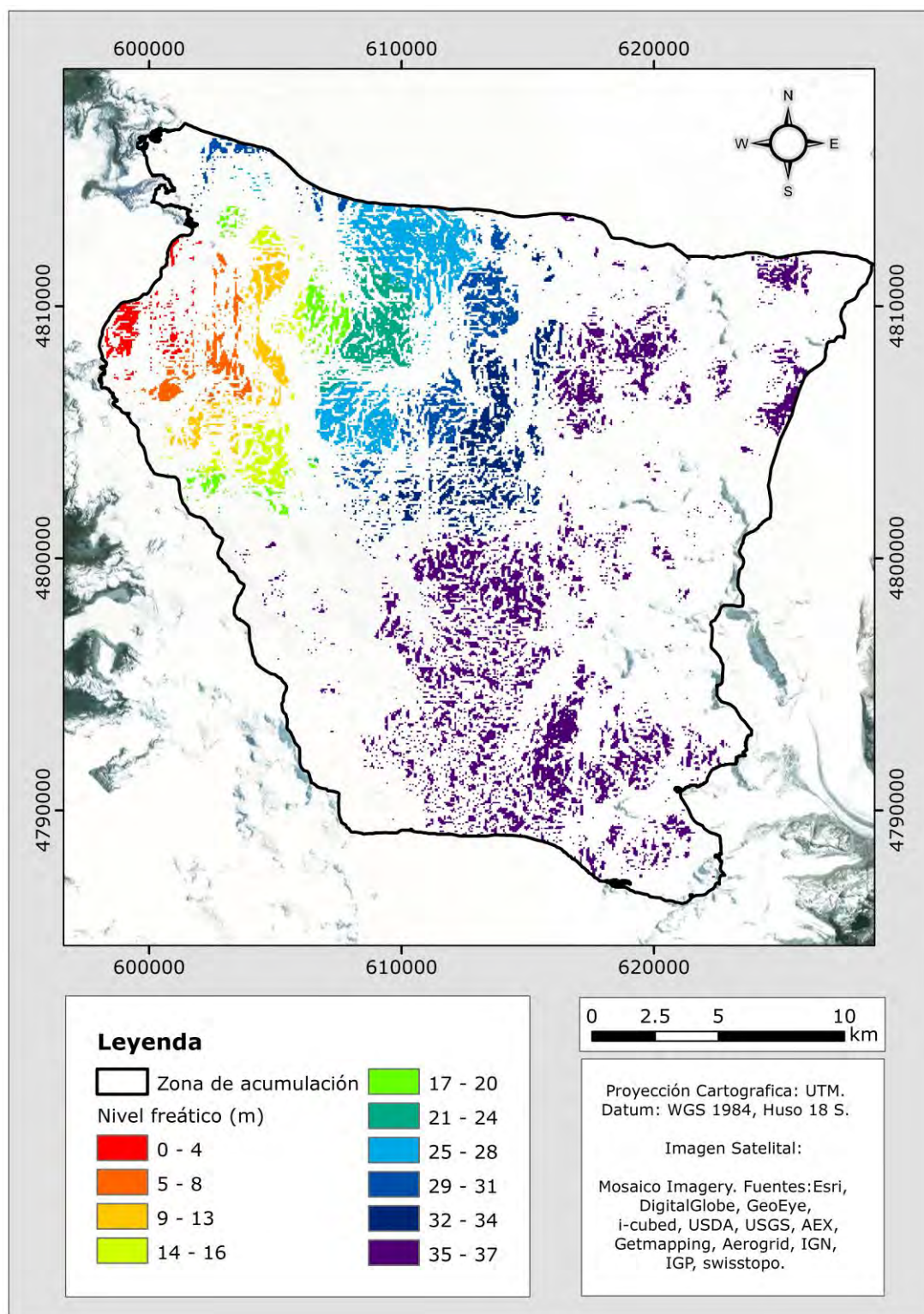


Figura 6.5.2-C. Resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Quintín.

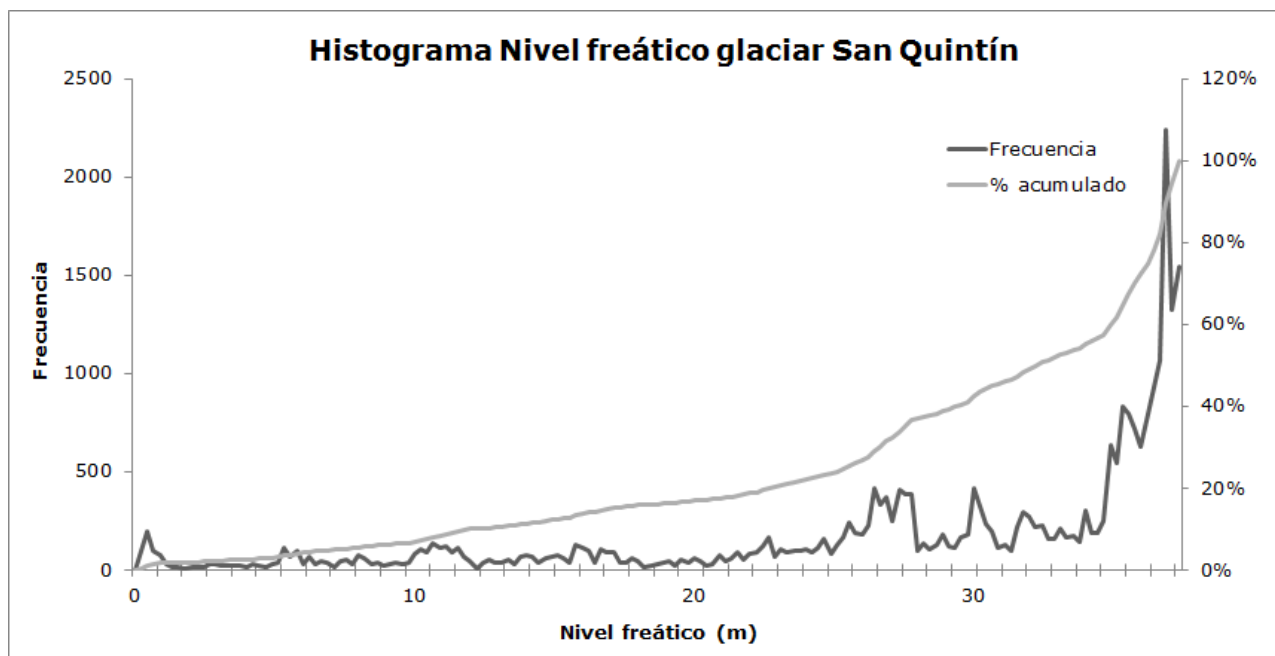


Figura 6.5.2-D. Histograma de resultados interpolados de nivel freático del glaciar San Quintín.

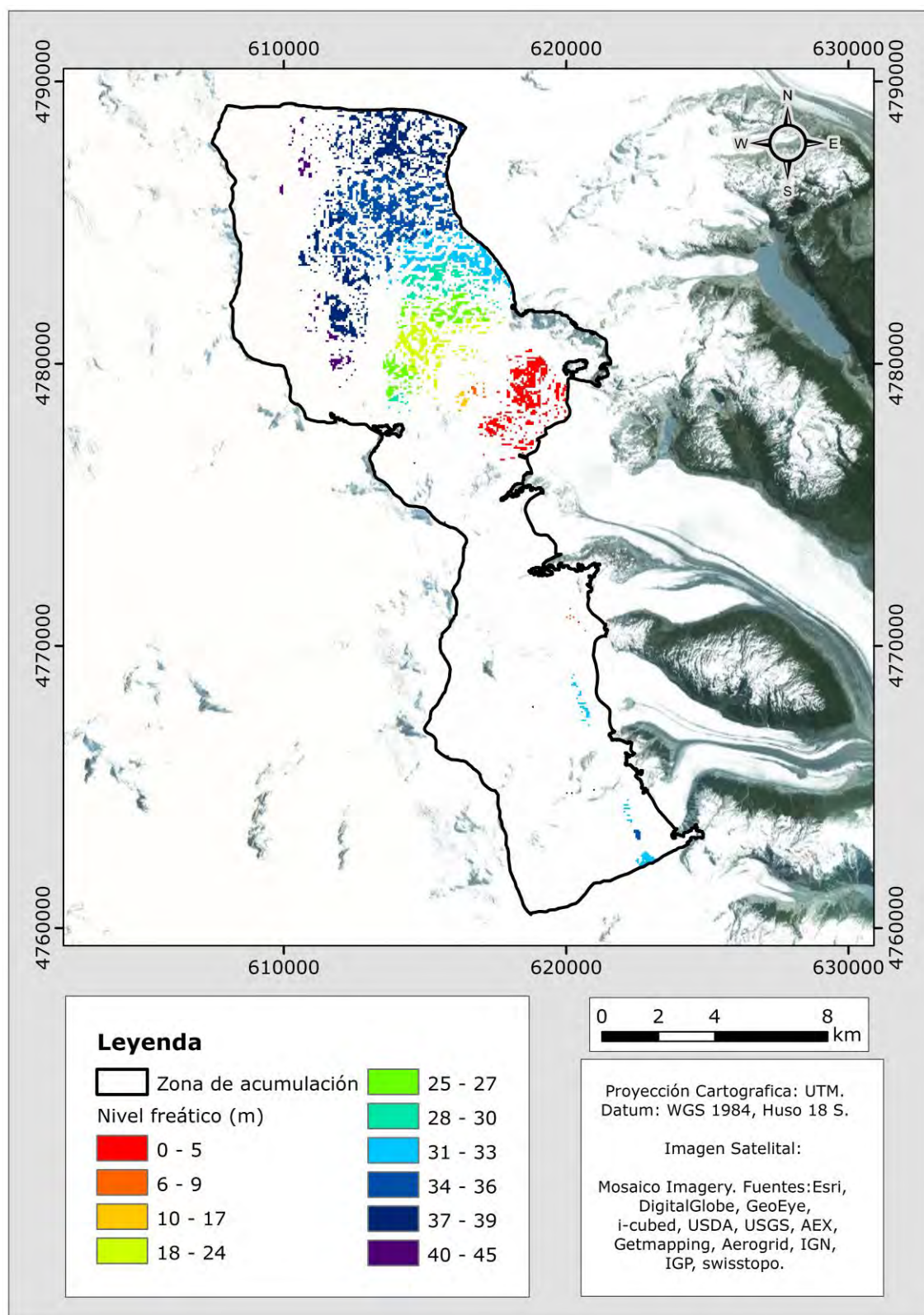


Figura 6.5.2-E. Resultados interpolados de nivel freático del glaciar Colonia.

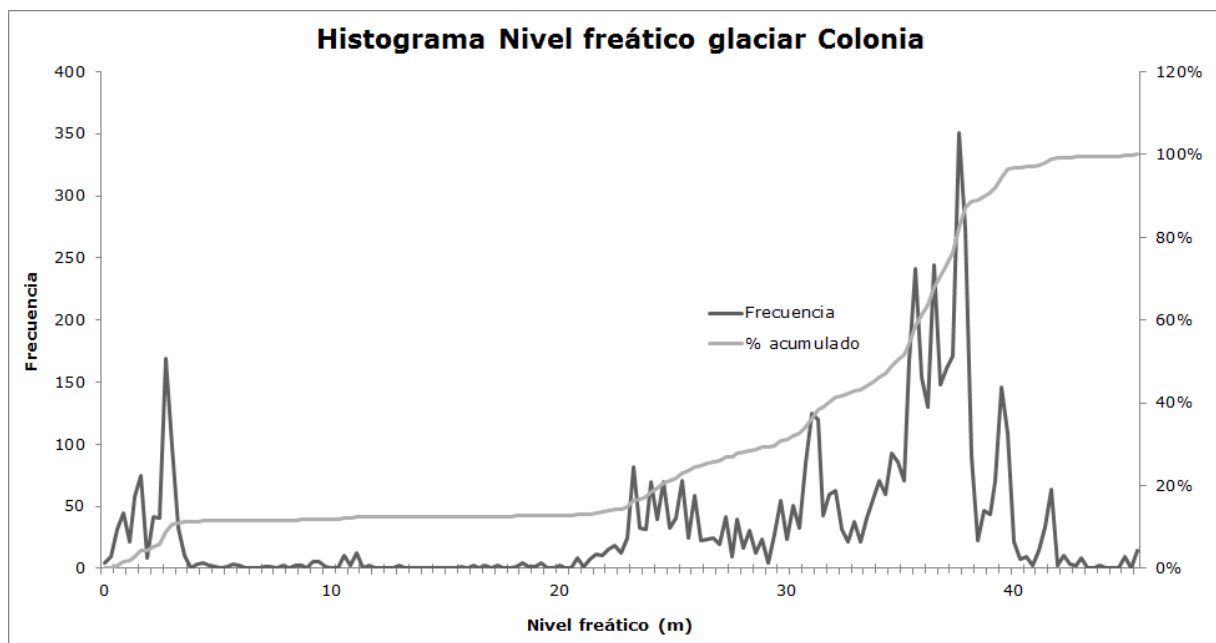


Figura 6.5.2-F. Histograma de resultados interpolados de nivel freático del glaciar Colonia.

6.5.3. Conclusiones

A partir del análisis de las Figuras 6.5.2-A a F se puede concluir que con los datos obtenidos de espesores de la napa freática y los supuestos asumidos, es posible obtener valores interpolados razonables que están espacialmente distribuidos en las 3 cuencas en estudio (San Rafael, San Quintín, Colonia). Se observa, al igual que con los datos originales de radar, que los espesores mínimos de profundidad de nivel freático ocurren cerca de la Línea de Equilibrio, donde se han definido valores igual a cero; y los valores máximos ocurren en los sectores más altos que poseen pendientes suaves (menores al 2%). La Tabla 6.5.3-A presenta un resumen de los valores obtenidos para la zona de acumulación de los 3 glaciares.

Tabla 6.5.3-A. Espesores interpolados de la napa freática para la zona de acumulación de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia.

Glaciar	Mín.	Máx.	Media	Desv. est.	Nº datos
	m	m	m	m	(pixeles 60x60)
San Rafael	2,2	46,4	29,0	9,9	27.712
San Quintín	0,1	36,8	28,4	9,4	28.351
Colonia	0,1	44,9	29,5	11,2	5.741

7. CARACTERIZACIÓN DEL MANTO NIVAL

Para caracterizar el manto nival se realizaron mediciones con 2 pozos de nieve en 2013 y 2014 (estratigrafía y densidad de nieve hasta una profundidad de 4 m), 2 torres nivométricas (altura de nieve en el periodo agosto 2013-agosto 2014) y mediciones con muestreador Monte Rosa en 2013 y 2014 (densidad de la capa superficial de 1 m de espesor en 9 balizas) (Fig. 7-A).

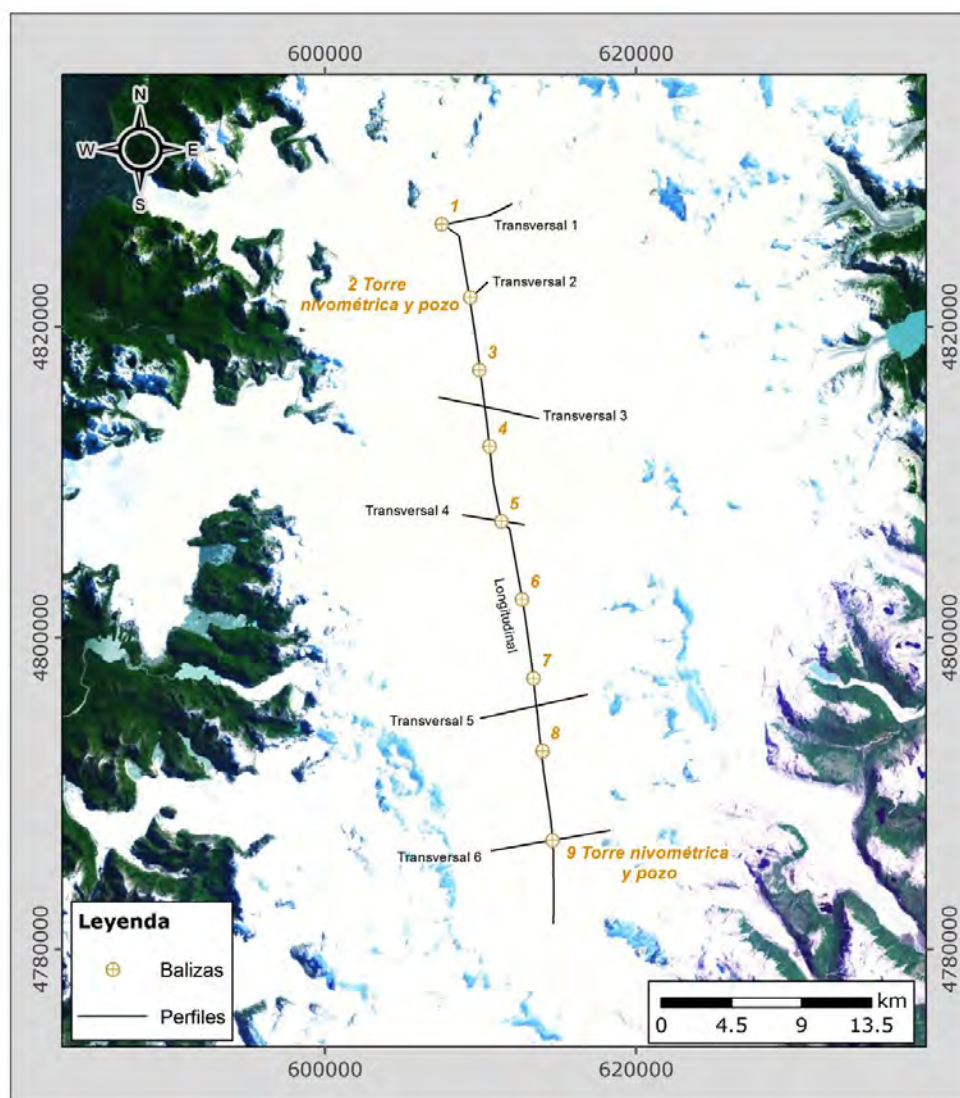


Figura 7-A. Ubicación de la balizas instaladas en la ruta del levantamiento GPR y GPS, pozos de nieve y torres nivométricas.

7.1. POZOS DE DENSIDAD Y TEMPERATURA DE LA NIEVE

7.1.1. Metodología

Para realizar un análisis estratigráfico del manto nival se realizaron mediciones de densidad de nieve y estratigrafía en los pozos considerando la metodología especificada en el Manual de Nieve y Nivometría (DGA, 2008). Este manual contempla las siguientes mediciones en un pozo de nieve:

- Profundidad.
- Estructuras en el manto (en particular espesor de estratos).
- Densidad.
- Textura.
 - Forma de los granos.
 - Tamaño de los granos.
- Contenido de agua líquida.
- Impurezas.
- Resistencia mecánica de la nieve.
- Temperatura.
- Dureza de la nieve.
- Edad de los estratos del depósito de nieve.

En este proyecto, y considerando que el objetivo principal es evaluar la acumulación anual de nieve, se consideró relevante establecer estructuras en el manto, densidad, forma y tamaño de granos, y temperatura.

En agosto 2013 y agosto 2014 se determinó la densidad y temperatura de la nieve desde la superficie (0 m), en intervalos de 22,5 cm, hasta una profundidad de 4 metros. El Pozo 1 se ubicó en la intersección de la transecta transversal C-C' con el perfil longitudinal (ver capítulo 1, Fig. 1.2-A), a cota 1160 m, UTM 18G E 609.347, N 4.821.929. El Pozo 2 se ubicó en la intersección de la transecta transversal G-G' con el perfil longitudinal (ver capítulo 1, Fig. 1.2-A), a cota 1530 m, UTM 18G E 614.645, N 4.787.024.

La densidad se midió con un muestreador de aluminio con forma de paralelepípedo de caras rectangulares (hexaedro) de dimensiones 25,2 cm, 4,7 cm x 4,7 cm, área de 22,09 cm², tara 250 g, y una balanza digital de una precisión de 0,1 g. El paralelepípedo tenía

una marca a 2,5 cm de su extremo, hasta donde se llenaba de nieve, vale decir el largo de la muestra de nieve era del orden de 22,5 cm, con un volumen de 497 cm³, o sea aproximadamente ½ litro. Para la temperatura se utilizó un termómetro análogo, de dial, de una precisión de 0,5°C y exactitud de 1°C.

7.1.2. **Pozos de densidad y temperatura de la nieve en 2013**

Los resultados para 2013 se presentan en las Tablas 7.1.2-A y 7.1.2-B y en las Figs. 7.1.2-A y 7.1.2-B. Se aprecia que la densidad de la nieve es notablemente menor en el Pozo Colonia 2013 (Pozo 2) comparado con el Pozo San Rafael 2013 (Pozo 1), lo cual es razonable considerando la mayor cota y condiciones más frías en el Pozo 2. Los perfiles de densidad muestran que en ambos pozos la densidad disminuye de forma importante en el primer metro y medio y luego sigue disminuyendo pero de forma más lenta hasta alcanzar valores cercanos a los 0,5 gr/cm³ a los 4 m de profundidad. Este valor de 0,5 gr/cm³ está en el rango de valores de densidad de la neviza de la neviza vieja (Cuffey & Paterson, 2010).

En cuanto a la temperatura de la nieve (Fig. 7.1.2-B), si bien es cierto en promedio es menor en el Pozo Colonia 2013, la temperatura del Pozo San Rafael 2013 en los primeros 50 cm es especialmente baja, alcanzando los -12°C. Ello se debe a condiciones atmosféricas frías durante la noche y la mañana anterior a la excavación del pozo, del orden de -19°C, ver bitácora y Fig. 4.2-A.

Tabla 7.1.2-A. Densidad, temperatura y granulometría Pozo N.1, glaciar San Rafael, cota 1160 m s.n.m., 2013, que denominamos Pozo San Rafael 2013.

Glaciar	San Rafael CHPN			Fecha	23-24 agosto 2013	Observaciones
	POZO SAN RAFAEL 2013 UTM 18G E 609.347 N 4.821.929			Cota	1160 m s.n.m.	
					Muestreador paralelepípedo de 1/2 l	
Muestra Nº	Prof. (cm)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Temp. (°C)	Grano (mm)	
Superficie	0,0			-12,0	0,5	
1	22,5	402,0	0,31	-9,0	0,5	
2	45,0	410,0	0,32	-4,8	0,25-0,5	64-66 cm capa dura granos redondeados
3	67,5	420,0	0,34	-3,2	1	
4	90,0	449,5	0,40	-0,5	1	Nieve granos redondeados, se pega el muestreador
5	112,5	483,0	0,47	0,0		
6	135,0	484,5	0,47	-0,5	1-2	Nieve dura, incluye 20 mm de nieve húmeda
7	157,5	505,1	0,51	0,0	1-2	
8	180,0	475,9	0,45	0,0	1-2	Nieve granos redondeados grano suelto (sin cohesión)
9	202,5	479,5	0,46	0,0		T° del aire -21°C
10	225,0	485,4	0,47	-3,2	0,5-1	Numerosas costras de neviza-hielo de 6 mm de espesor espaciadas cada 6 cm
11	247,5	496,0	0,49	-2,6	0,5-1	A 2,3 m 20 mm de una costra de neviza-hielo incluida en muestra
12	270,0	475,4	0,45	-6,0	0,5	
13	292,5	470,6	0,44	-4,0	0,5-1	Bajo 2,9 m cambia a nieve de granos semi redondeados y semi faceteados
14	315,0	499,9	0,50	-1,0	1-1,5	
15	337,5	506,9	0,52	-0,5	1-1,5	Nieve granos redondeados
16	360,0	509,9	0,52	-1,5	1-1,5	Nieve granos redondeados
17	382,5	513,1	0,53	-0,8	0,5-1	
18	405,0	509,4	0,52	-0,8	0,5-1	

Tabla 7.1.2-B. Densidad, temperatura y granulometría Pozo N.2, glaciar Colonia, cota 1530 m s.n.m., 2013, que denominamos Pozo Colonia 2013. Todos los granos son redondeados.

MEDICIONES EN POZO DE NIEVE						
Glaciar	Colonia CHPN			Fecha	2-3 septiembre 2013	Observaciones
	POZO COLONIA 2013 UTM 18G E 614.645 N 4.787.024			Cota	1530 m s.n.m.	
					Muestreador paralelepípedo área 22,09 cm ² , aprox. 1/2 l, tara 250 g	
Muestra N°	Prof. (cm)	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Temp. (°C)	Grano (mm)	
Superficie	0,0			-3,0		
1	22,5	320,1	0,14	-4,0	0,5	
2	45,0	331,0	0,16	-4,0	0,5	
3	67,5	356,9	0,22	-4,0	0,5	Costra dura 77-78 cm
4	90,0	410,8	0,32	-4,0	0,5	Nieve quebradiza
5	112,5	423,8	0,35	-4,3	0,5	
6	135,0	444,8	0,39	-5,0	1	138 cm costra de hielo, inicio nieve dura
7	157,5	452,8	0,41	-5,0	1	
8	180,0	430,0	0,36	-5,0	0,25-0,5	Nieve blanda
9	202,5	463,8	0,43	-5,0	0,25	
10	225,0	453,0	0,41	-6,0	1-0,25	
11	247,5	452,2	0,41	-4,0	1-0,25	
12	270,0	467,6	0,44	-4,0	1-0,25	
13	292,5	451,1	0,40	-3,2	1-0,25	
14	315,0	468,0	0,44	-3,0	1-0,25	
15	337,5	481,8	0,47	-2,8	0,25	Cambio de tamaño de grano
16	360,0	483,3	0,47	-2,5	0,5-0,25	
17	382,5	481,7	0,47	-2,5	0,5	
18	405,0	503,4	0,51	-2,5	0,5	

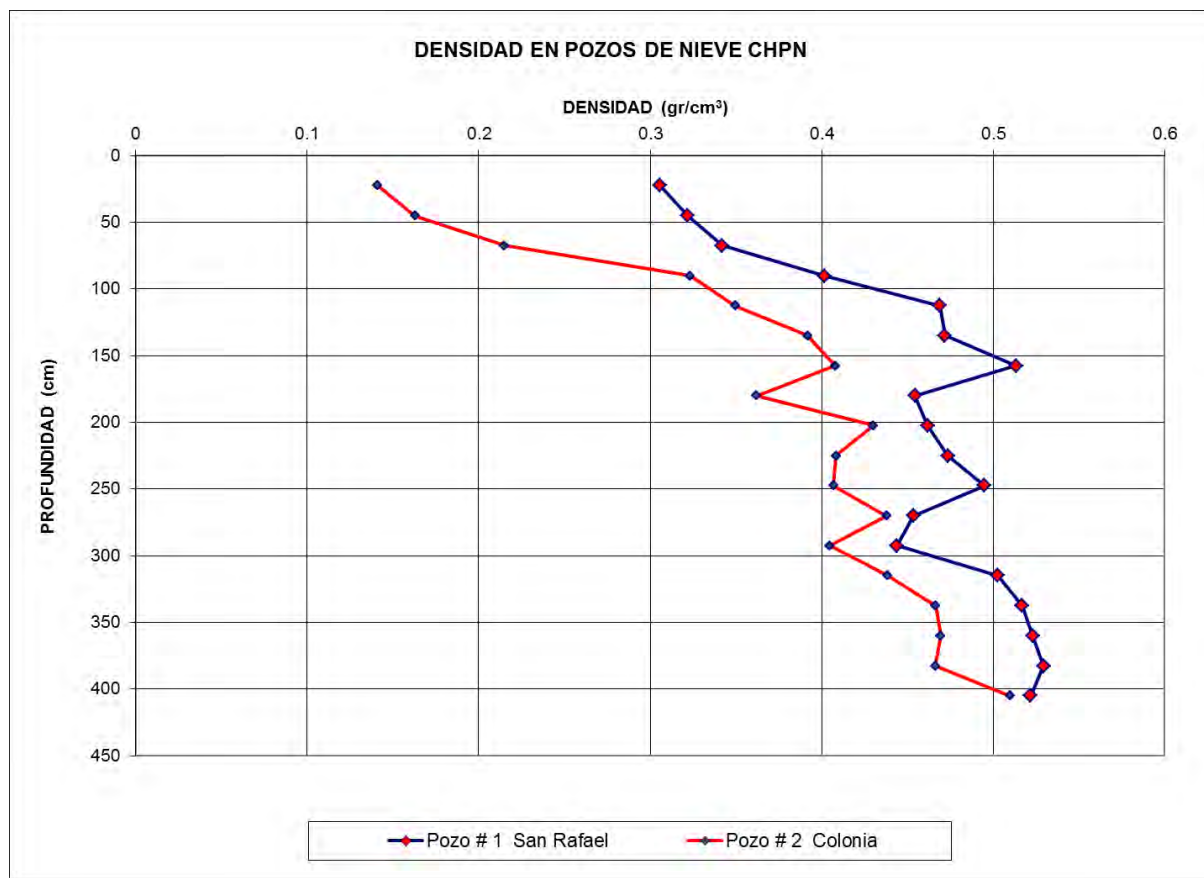


Fig. 7.1.2-A. Perfiles de densidad de la nieve en el Pozo 1 (Pozo San Rafael 2013, glaciar San Rafael cota 1160 m) y Pozo 2 (Pozo Colonia 2013, glaciar Colonia cota 1530 m), 2013.

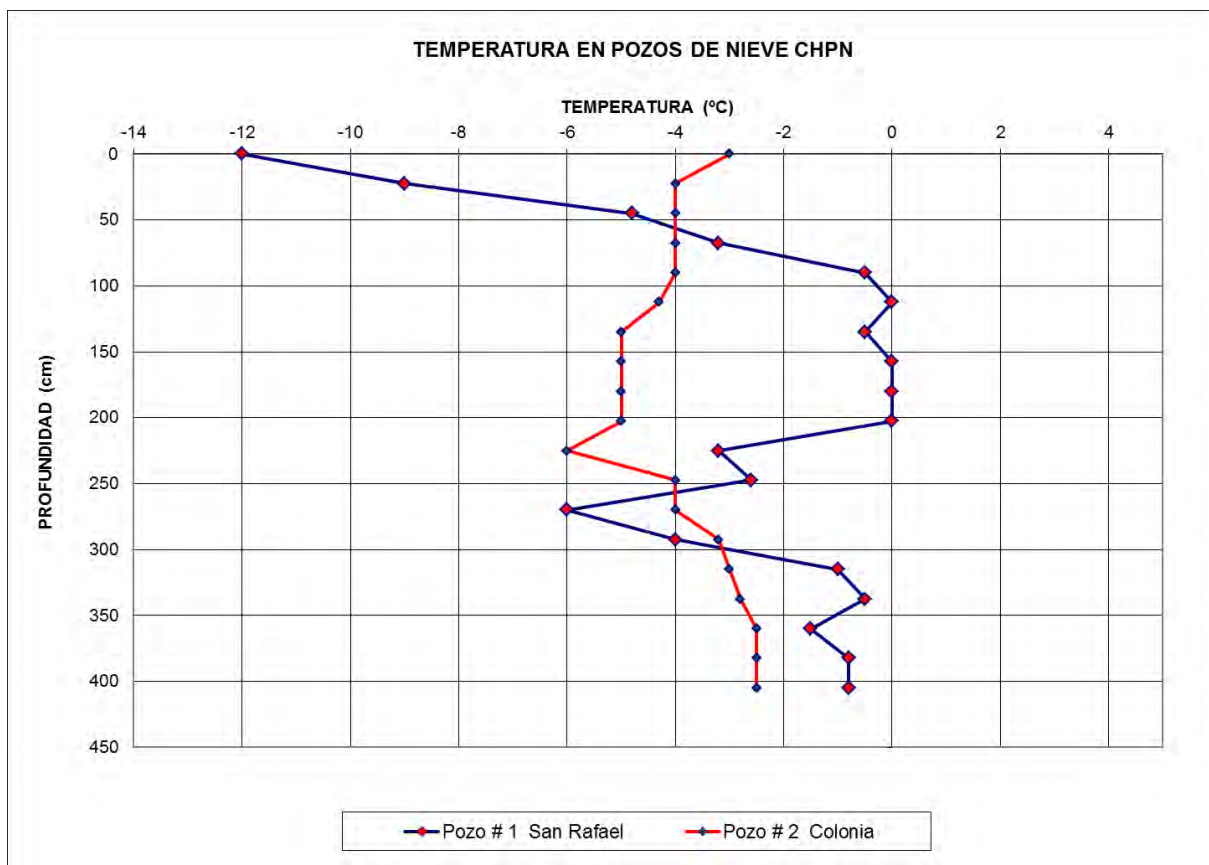


Fig. 7.1.2-B. Perfiles de temperatura de la nieve en el Pozo 1 (Pozo San Rafael 2013, cota 1160 m) y Pozo 2 (Pozo Colonia 2013, cota 1530 m), 2013.

A partir del espesor de los estratos de nieve y su densidad se puede obtener el equivalente en agua (eq.a.) del manto de nieve estudiado, que corresponde a la profundidad equivalente del manto si dicha masa de nieve tuviese una densidad igual a la del agua (1 g/cm^3). En las Tablas 7.1.2-C y D se presentan los cm eq.a. en cada nivel y el total de cm eq.a. en los 4,05 m de profundidad muestreados. En el Pozo San Rafael 2013 se encontró un total de 182,9 cm eq.a. y en el Pozo Colonia 2013 un total de 150,8 cm eq.a.

Tabla 7.1.2-C. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo San Rafael 2013.

Nivel	Profundidad (cm)		Densidad	eq.a.
	Desde	Hasta	g/cm ³	cm
1	-	22,5	0,31	6,98
2	22,5	45,0	0,32	7,20
3	45,0	67,5	0,34	7,65
4	67,5	90,0	0,40	9,00
5	90,0	112,5	0,47	10,58
6	112,5	135,0	0,47	10,58
7	135,0	157,5	0,51	11,48
8	157,5	180,0	0,45	10,13
9	180,0	202,5	0,46	10,35
10	202,5	225,0	0,47	10,58
11	225,0	247,5	0,49	11,03
12	247,5	270,0	0,45	10,13
13	270,0	292,5	0,44	9,90
14	292,5	315,0	0,50	11,25
15	315,0	337,5	0,52	11,70
16	337,5	360,0	0,52	11,70
17	360,0	382,5	0,53	11,93
18	382,5	405,0	0,52	11,70
			TOTAL	183,83

Tabla 7.1.2-D. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo Colonia 2013.

Nivel	Profundidad (cm)		Densidad	eq.a.
	Desde	Hasta	g/cm ³	cm
1	-	22,5	0,14	3,15
2	22,5	45,0	0,16	3,60
3	45,0	67,5	0,22	4,95
4	67,5	90,0	0,32	7,20
5	90,0	112,5	0,35	7,88
6	112,5	135,0	0,39	8,78
7	135,0	157,5	0,41	9,23
8	157,5	180,0	0,36	8,10
9	180,0	202,5	0,43	9,68
10	202,5	225,0	0,41	9,23
11	225,0	247,5	0,41	9,23
12	247,5	270,0	0,44	9,90
13	270,0	292,5	0,4	9,00
14	292,5	315,0	0,44	9,90
15	315,0	337,5	0,47	10,58
16	337,5	360,0	0,47	10,58
17	360,0	382,5	0,47	10,58
18	382,5	405,0	0,51	11,48
			Total	153,00

7.1.3. Pozos de densidad y temperatura de la nieve en 2014

Los resultados para 2014 se presentan en las Tablas 7.1.3-A y 7.1.3-B y en las Figs. 7.1.3-A y 7.1.3-B. Se aprecia, al igual que en 2013, que la densidad de la nieve es notablemente menor en el Pozo Colonia 2014 comparado con el Pozo San Rafael 2014, lo cual era esperable considerando la mayor cota y condiciones más frías en el Pozo Colonia 2014. Los perfiles de densidad muestran que en ambos pozos la densidad disminuye de forma importante en el primer metro y medio y luego sigue disminuyendo pero de forma más lenta hasta alcanzar valores cercanos a los 0,5 gr/cm³ a los 4 m de profundidad. Este valor de 0,5 gr/cm³ está en el rango de valores de densidad de la neviza vieja Cuffey y Paterson (2010). La temperatura de la nieve (Fig. 8.3-B) en promedio es menor en el Pozo Colonia 2014 en comparación al Pozo San Rafael 2014.

Tabla 7.1.3-A. Densidad, temperatura y granulometría Pozo San Rafael 2014, cota 1152 m s.n.m. UTM 18G. Grano redondeado a menos que se especifique lo contrario.

Glaciar	San Rafael CHPN			Fecha	24-25/08/2014	Observaciones
Ubicación	Pozo San Rafael 2014 UTM E 608.902 N 4.822.024			Cota	1152 m s.n.m.	
				Tipo de muestreador	Paralelepípedo área 22,09 cm², aprox. 1/2 l, tara 250 g	
Muestra Nº	Profundidad (cm)	Peso (g)	Densidad (g/cm³)	Temperatura (°C)	Grano (mm)	
Superficie	0,0			0,0	1- 1,5	
1	22,4	470,2	0,45	0,0	1	6/8 techo nubes 3600 m s.n.m. temperatura ambiente +2,2 °C
2	47,8	425,4	0,31	0,0	0,5	
3	67,2	424,8	0,41	0,0	0,5-1	
4	89,6	453	0,41	0,0	1	
5	112,0	465,1	0,43	0,0	1-2	
6	134,4	492,8	0,49	0,0	2-2,5	
7	156,8	494	0,49	0,0	1-2	
8	179,2	490,7	0,49	0,0	1-2	Costras delgadas de hielo
9	201,6	513,2	0,53	0,0	1-1,5	Granos semi redondeados y semi faceteados
10	224,0	512	0,53	0,0	1-2	Granos semi redondeados y semi faceteados
11	246,4	517,5	0,54	0,0	1,5-2	Principalmente granos semi redondeados y semi faceteados intercalados con finas costras de hielo
12	268,8	511,2	0,53	0,0	0,5-1	Granos semi redondeados y semi faceteados
13	291,2	537,6	0,58	0,0	0,5-1	
14	313,6	528,7	0,56	0,0	0,5-1	Se suspenden mediciones el día 24 agosto
15	336,0	518,6	0,54	0,0	1-2	Continuación de mediciones 25 agosto, 13:00 h, T +4°C
16	358,4	529,8	0,57	0,0	1-2	Granos semi redondeados y semi faceteados
17	380,8	530,8	0,57	0,0	2	Nieve dura
18	403,2	551,8	0,61	0,0	2-3	Dificultad en la penetración

Tabla 7.1.3-B. Densidad, temperatura y granulometría Pozo Colonia 2014, cota 1526 m s.n.m. Granos de nieve redondeados a menos que se indique lo contrario.

Glaciar	Colonia CHPN			Fecha	24-25/08-2014	Observaciones
Ubicación	POZO COLONIA 2014			Cota	1527 m s.n.m	
	UTM 18G E 614.640 N 4.786.994			Tipo de muestreador	Paralelepípedo área 22,09 cm², aprox. 1/2 l	
Muestra N°	Profundidad (cm)	Peso (g)	Densidad (g/cm³)	Temperatura (°C)	Grano (mm)	
Superficie	0,0			-3,0		Superficie de nieve con rugosidad suave, cielo 7/8 cirrus
1	22,4	351,8	0,21	-4,0	0,25	
2	47,8	444,0	0,35	-4,0	0,25-0,5	De 30 35 cm capa nieve dura
3	67,2	434,5	0,43	-4,0	0,5	
4	89,6	475,6	0,46	-4,0	0,5-1	Dificultad en la penetración cambio de tamaño de grano
5	112,0	449,1	0,40	-4,3	0,5	
6	134,4	503,0	0,51	-5,0	0,5-1	125 a 27 cm lente de nieve dura, dificultad en la penetración
7	156,8	461,0	0,43	-5,0	0,25-0,5	
8	179,2	472,5	0,45	-5,0	0,25-0,5	Nieve blanda con costras de hielo de 0,5 mm
9	201,6	473,5	0,45	-5,0	0,25	
10	224,0	472,8	0,45	-6,0	0,25	Temperatura ambiente +5,0°C
11	246,4	474,8	0,45	-4,0	0,25	
12	268,8	466,1	0,44	-4,0	0,5-1	
13	291,2	482,1	0,47	-3,2	0,5	
14	313,6	487,7	0,48	-3,0	0,5-1	
15	336,0	499,3	0,50	-2,8	0,5-1	
16	358,4	526,2	0,56	-2,5	0,5-1	De 331 a 332 cm costra de nieve dura, debajo grano semi redondeado a semi faceteado
17	380,8	516,1	0,54	-2,5	0,5-1	363 a 364 capa cm capa de nieve dura
18	403,2	501,8	0,51	-2,5	0,5-1	7/8 nubosidad, temperatura ambiente +6,0°C

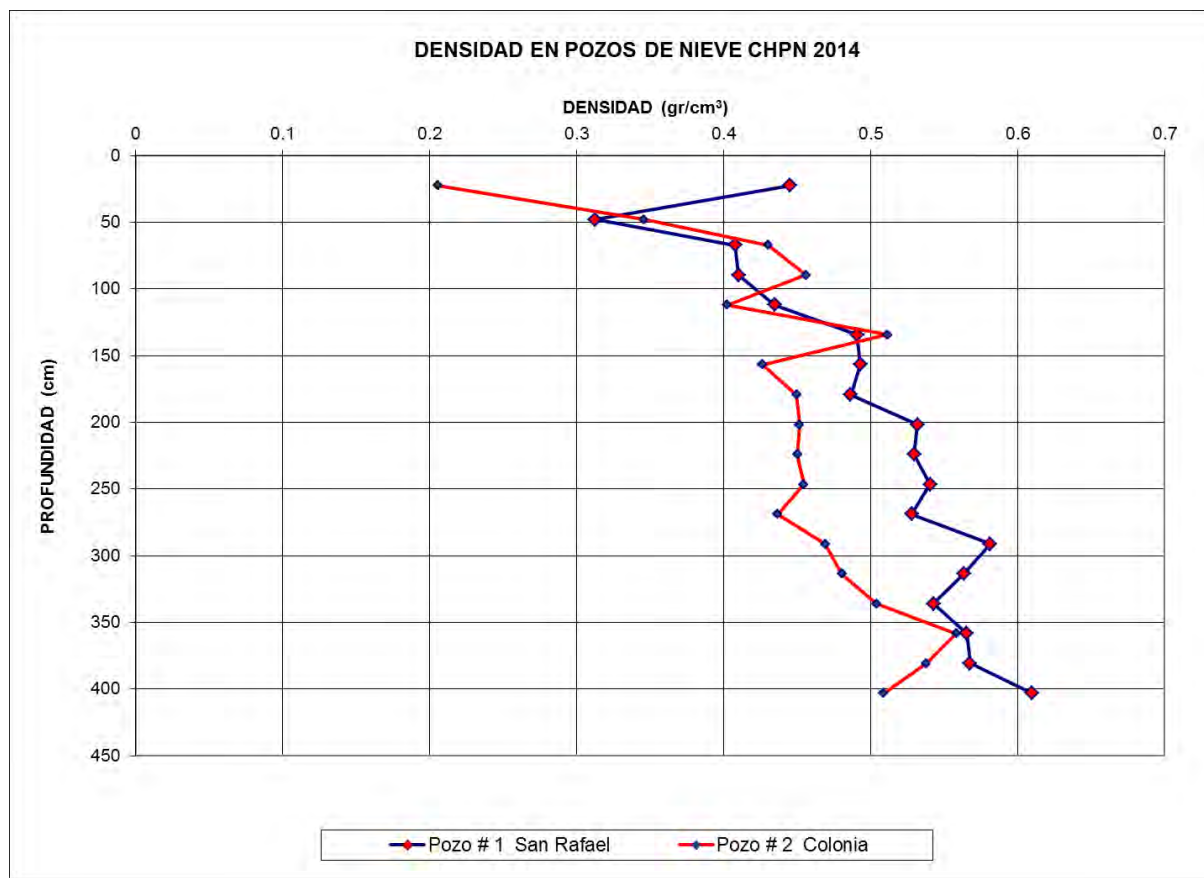


Fig. 7.1.3-A. Perfiles de densidad de la nieve en el Pozo 1 (Pozo San Rafael 2014 cota 1152 m s.n.m) y Pozo 2 (Pozo Colonia 2014 cota 1526 m s.n.m.).

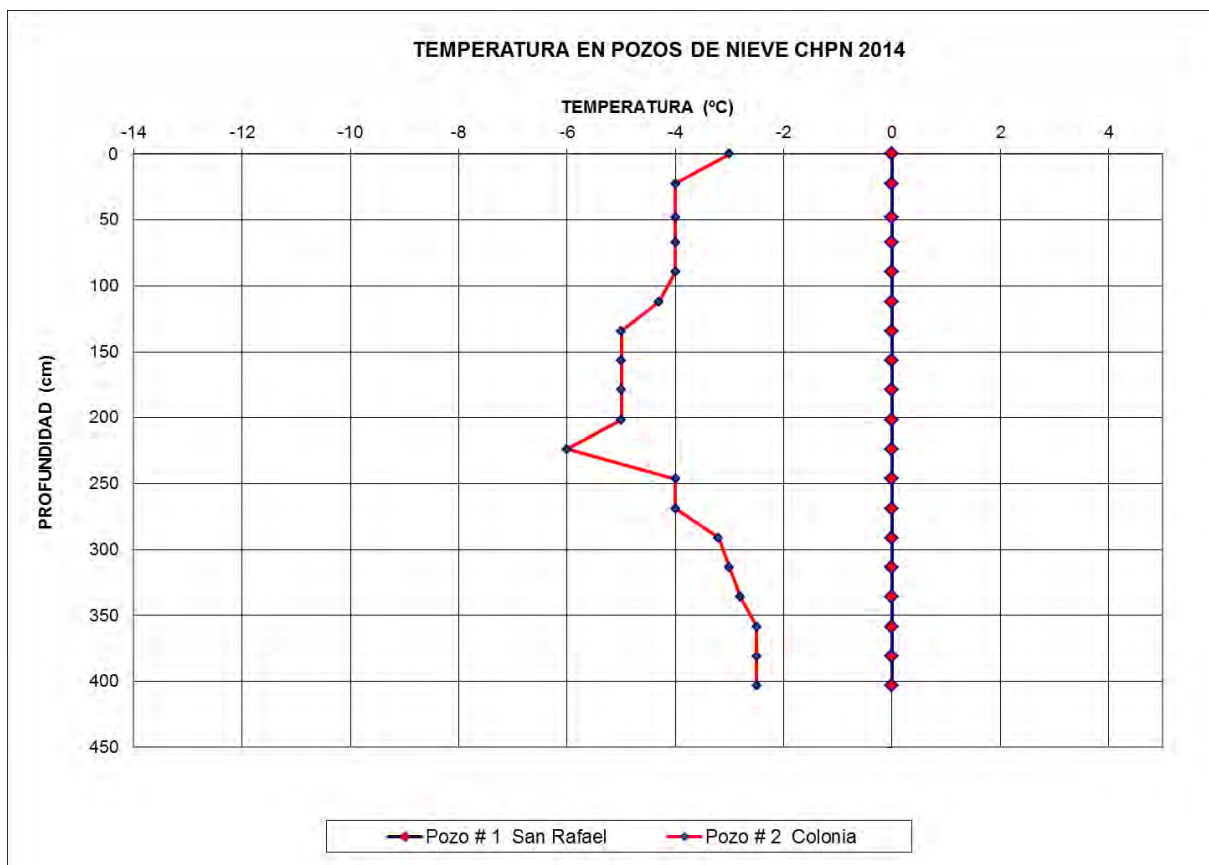


Fig. 7.1.3-B. Perfiles de temperatura de la nieve en el Pozo San Rafael 2014 (glaciar San Rafael cota 1152 m s.n.m.) y Pozo Colonia 2014 (glaciar Colonia cota 1526 m s.n.m.).

En las Tablas 7.1.3-C y D se presentan los cm eq.a. en cada nivel y el total de cm eq.a. en los cuatro metros de profundidad muestreados. En el Pozo San Rafael 2014 se encontró un total de 182,6 cm eq.a. y en el Pozo Colonia 2014 un total de 151,2 cm eq.a.

Tabla 7.1.3-C. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo San Rafael 2014.

Nivel	Profundidad (cm)		Densidad	eq.a.
	Desde	Hasta	g/cm ³	cm
1	0,0	22,5	0,45	10,13
2	22,5	45,0	0,31	6,98
3	45,0	67,5	0,41	9,23
4	67,5	90,0	0,41	9,23
5	90,0	112,5	0,43	9,68
6	112,5	135,0	0,49	11,03
7	135,0	157,5	0,49	11,03
8	157,5	180,0	0,49	11,03
9	180,0	202,5	0,53	11,93
10	202,5	225,0	0,53	11,93
11	225,0	247,5	0,54	12,15
12	247,5	270,0	0,53	11,93
13	270,0	292,5	0,58	13,05
14	292,5	315,0	0,56	12,60
15	315,0	337,5	0,54	12,15
16	337,5	360,0	0,57	12,83
17	360,0	382,5	0,57	12,83
18	382,5	405,0	0,61	13,73
			Total	203,40

Tabla 7.1.3-D. Equivalente en agua para cada nivel en el Pozo Colonia 2014.

Nivel	Profundidad (cm)		Densidad	eq.a.
	Desde	Hasta	g/cm ³	cm
1	0,0	22,5	0,21	4,73
2	22,5	45,0	0,35	7,88
3	45,0	67,5	0,43	9,68
4	67,5	90,0	0,46	10,35
5	90,0	112,5	0,4	9,00
6	112,5	135,0	0,51	11,48
7	135,0	157,5	0,43	9,68
8	157,5	180,0	0,45	10,13
9	180,0	202,5	0,45	10,13
10	202,5	225,0	0,45	10,13
11	225,0	247,5	0,45	10,13
12	247,5	270,0	0,44	9,90
13	270,0	292,5	0,47	10,58
14	292,5	315,0	0,48	10,80
15	315,0	337,5	0,5	11,25
16	337,5	360,0	0,56	12,60
17	360,0	382,5	0,54	12,15
18	382,5	405,0	0,51	11,48
		Total		182,03

7.1.4. Comparación equivalente en agua 2013-2014

En las Tablas 7.1.2-C y D, y 7.1.3-C y D se calcula el total equivalente en agua para la capa nival de los primeros 405 cm para 2013 y 2014 en los pozos San Rafael y Colonia. Se observa que el total equivalente an agua para los 405 cm superficiales es mayor en 2014 comparado con 2013, del orden del 11% más para San Rafael y un 19% más para el Colonia, en promedio un 15% más en ese periodo de 1 año. Ello se debe a que la densidad en 2013 fue bastante menor a la densidad superficial en 2014, con valores mínimos de 0,31 g/cm³ y 0,14 g/cm³ en San Rafael y Colonia respectivamente el 2013, y valores mínimos de 0,45 g/cm³ y 0,21 g/cm³ respectivamente en San Rafael y Colonia el 2014. Esta mayor densidad en 2014 respecto de 2013 está relacionada con la mayor temperatura de la nieve y por consiguiente con la proporción de agua líquida observada en 2014 (0°C en 2014 para San Rafael) respecto de 2013 (alrededor de -4°C en 2013

para el glaciar San Rafael).

7.2. ACUMULACIÓN DE NIEVE MEDIANTE TORRES NIVOMÉTRICAS

7.2.1. Metodología

En ambos pozos se instaló una torre nivométrica, que fue enterrada en la superficie del glaciar para medir la acumulación nival durante el periodo 2013/2014. Una torre fue ubicada por lo tanto en la meseta del glaciar San Rafael y la otra en la meseta del glaciar Colonia, km 5 y km 40 del perfil A-A' (ver capítulo 1, Fig. 1.2-A).

La torre sobre el glaciar San Rafael consistió en 9 m de tubo de fierro galvanizado de un diámetro de 2" al cual se sumó en la sección superior 9 m de torre de sección triangular de 0,3 m de dimensión lateral tipo mecano, compuesta por tubos de aluminio de 1 ¼" de diámetro y 3,2 mm de espesor, la cual fue armada al momento de la instalación. De la estructura resultante de 18 m, 5 m se instalaron sobre la superficie y el resto bajo la nieve.

La torre sobre el glaciar Colonia consistió en 6 m de tubo galvanizado de 2", más 10 m de torre de sección triangular de 0,3 m de lado tipo mecano, compuesta por tubos de aluminio de 1¼" de diámetro y 32 mm de espesor. La estructura tiene un largo total de 16 m, de los cuales 8 m quedaron sobre la superficie.

Se instalaron 4 sensores de temperatura en las torres y un sensor de altura de nieve. Los sensores de temperatura son Campbell del tipo 109 Temperature Probe, cuyo rango de medición es entre -50°C y 70°C y un error máximo de 0,5 °C. Dos sensores de temperatura se instalaron sobre la superficie para medir la temperatura del aire a dos alturas diferentes según el esquema de la Figura 8.5-A, (1,5 m y 4 m glaciar San Rafael y 1,5 m y 5 m en glaciar Colonia) y dos sensores se instalaron enterrados en la nieve a distintas profundidades para medir la temperatura de hielo/nieve (2 m y 4 m de profundidad en las dos torres). Los sensores de medición de temperatura del aire se instalaron con protector plástico de radiación solar Campbell.

Los sensores de altura de nieve son Campbell tipo SR50A con precisión de 1 cm o 0,4% de la distancia. Estos sensores se instalaron a 5 m de la superficie en el caso de la torre

en el glaciar Colonia (mayor acumulación) y a 4 m de la superficie en la Torre en el glaciar San Rafael donde se espera menor acumulación y mayor ablación (Schaefer *et al.*, 2013). Ambos se instalaron en un travesaño instalado perpendicularmente en la torre, de un largo de 1,5 m, que permite una medición limpia sin interferencia de la torre hasta una altura de 5 m, ya que el ángulo de lectura del sensor es de 30° (Campbell Scientific Inc., 2007).

Los sensores de temperatura y altura de nieve se instalaron conectados a un data logger Campbell tipo CR800 programado para realizar mediciones de temperatura 4 veces al día, cada 6 horas y mediciones de altura de nieve una vez al día (SR50A conectado a 12 V), programado para coleccionar un dato diario una vez al día, a las 18:00 h. El objetivo de esta programación de medición es obtener el promedio diario de temperatura y de altura de nieve representativo mediante el mínimo de energía, de modo de realizar un balance simple de masa superficial (Francou, 2007) y un modelo de ablación grado-día (Rasmussen, 2009 y Koppes, 2011). Todo el sistema es alimentado por una batería de 110 Ah, diseñado para funcionar durante un periodo de al menos 1 año capturando mediciones periódicas para tener registro continuo de variaciones estacionales de acumulación/ablación, temperatura del aire y temperatura de la nieve en la meseta. No se contempló la instalación de un panel solar considerando que su gran área provocaría una resistencia al viento, y puede asimismo acumular escarcha, lo cual podría desestabilizar la torre.

La Fig. 7.2.1-A ilustra la disposición de las torres y los sensores respectivos. El programa del data logger se presenta en el Anexo del informe.

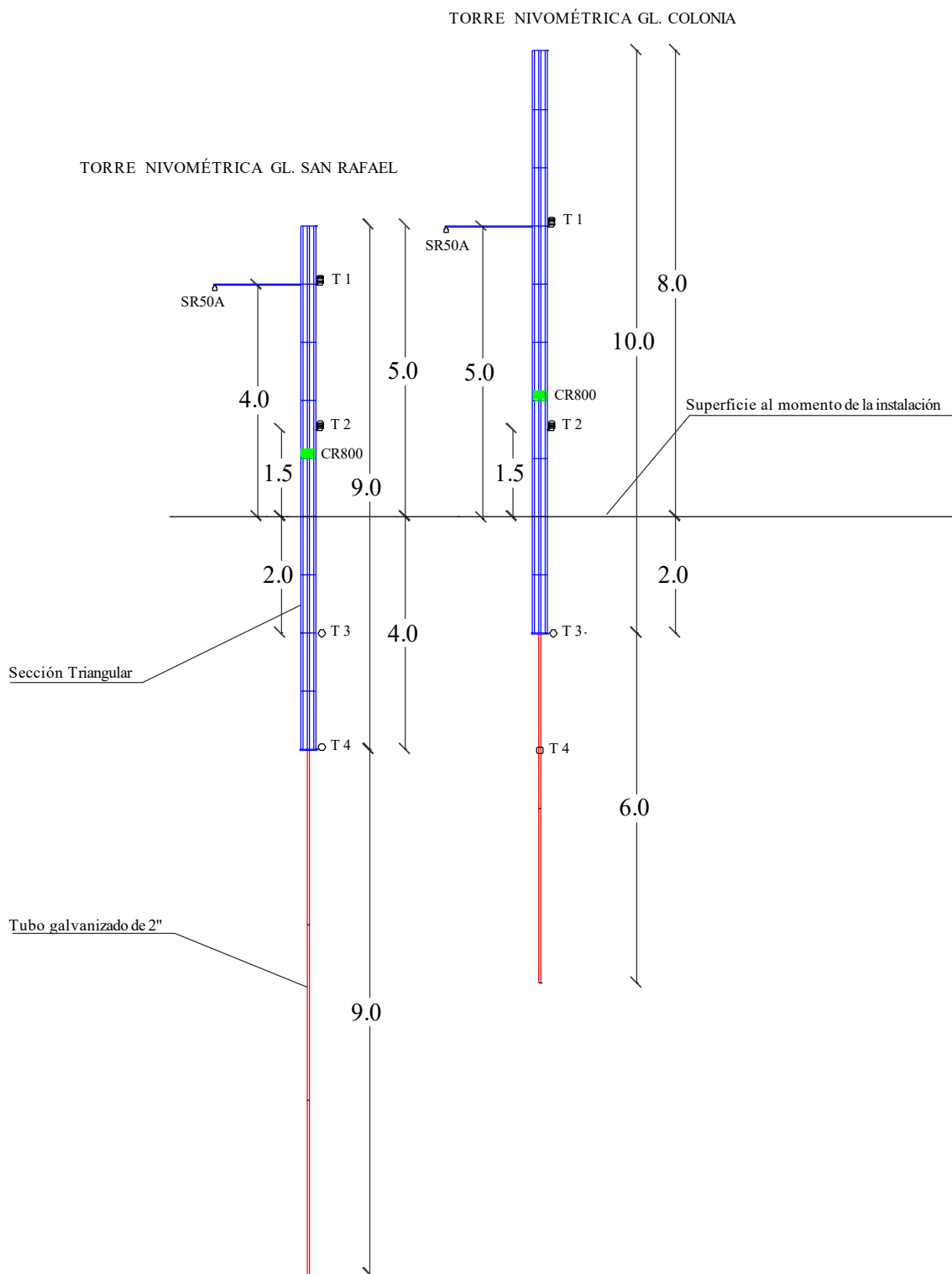


Fig. 7.2.1-A. Esquema de la estructura de las torres nivométricas y disposición de los termistores (T), sensores de altura de nieve (Campbell SR50A) y data loggers (DL).

7.2.2. Resultados

Durante la campaña 2014 ambas torres fueron encontradas. El 22 de agosto de 2014 se descubrió que la Torre 1 sobresalía 3,2 m sobre la superficie, por lo cual la acumulación anual desde 29 de agosto de 2013 (día de su instalación) fue de 1,8 m en el periodo de 1 año, puesto que se había dejado sobresaliendo 5 m. La Torre 1 se desplazó 416 m hacia el oeste (en dirección a la laguna San Rafael) en el periodo agosto 2013 a agosto 2014 (Tabla 7.2.2-A).

La Torre 2 se encontró el 24 de agosto de 2014 sobresaliendo 52 cm sobre la superficie, 24 m al sur (alejándose de la divisoria con el glaciar San Quintín) de su posición original instalada el 3 de septiembre de 2013, cuando se había dejado sobresaliendo 8 m (Tabla 7.2.2-A). Vale decir la acumulación anual fue de 7,48 m de altura de nieve en dicho periodo de 1 año (368 días).

Tabla 7.2.2-A. Cordenadas UTM de la Torre 1 y Torre 2 en 2013 y 2014. En 2014 fueron medidas con GPS geodésico en modo diferencial, y en 2013 con GPS navegador. La fecha de medición del año 2013 fue el 23-05-2013 y el año 2014 fue el 25-8-2013.

	Coordenadas 2013		Coordenadas 2014		Velocidad	Rumbo
	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	(cm/día)	(°)
Torre 1	4.821.881	609.295	4.822.024,4	608.902,2	113,94	290
Torre2	4.787.018	614.638	4.786.994,2	614.639,7	6,50	176

7.3. DENSIDAD SUPERFICIAL DE NIEVE CON MONTE ROSA

7.3.1. Metodología

Para analizar la densidad superficial a un costado de las balizas instaladas cada 5 km en la ruta de levantamiento GPR y GPS (perfil A-A'), en las campañas de agosto-septiembre de 2013 y agosto-septiembre de 2014 se determinó la densidad promedio del manto nival de la capa superior de 1 m, entre el km 5 y el km 40, mediante un tubo muestreador tipo Monte Rosa, con 2 o 3 muestreos en cada sitio, según el procedimiento indicado en el Manual de Nieve y Nivometría (DGA, 2008), ver Figs. 7.3.1-A y B.



Figura 7.3.1-A. Toma de densidades por medio de tubo muestreador Monte Rosa, agosto 2013.



Figura 7.3.1-B. Toma de densidades por medio de tubo muestreador Monte Rosa, agosto 2014.

7.3.2. **Resultados**

Se observa en las Tablas 7.3.2-A y B que la densidad exhibe una tendencia de disminución desde el sector más bajo de la meseta hacia los sectores más altos, como era de esperar considerando las condiciones más frías en los sectores altos.

Las densidades superiores a $0,4 \text{ gr/cm}^3$ corresponden a valores en el rango de neviza vieja (Cuffey y Paterson, 2010). Estos valores altos para nieve de la temporada, se pueden deber al efecto de la precipitación líquida que densifica la nieve y/o compactación por viento, y son típicos de la meseta del Campo de Hielo Patagónico Norte (Yamada, 1987; Matsuoka & Naruse, 1999).

Tabla 7.3.2-A. Densidad de la capa superior de 40", vale decir 101,6 cm de profundidad (excepto donde se indica), obtenida mediante taladro Monte Rosa con 2 sección de tubo enterradas parcialmente en 2013. Las balizas coinciden con las posiciones medidas mediante GPS diferencial indicadas en la Tabla 6.2.1-B. La densidad promedio para las 9 balizas es de 0,38 g/cm³.

Baliza	Cota (m s.n.m.)	Prof. exterior (")	Prof. interior (" de nieve)	Peso tubo vacío (U. A. M.)	Peso con muestra (U.A.M.)	Peso neto muestra (U.A.M.)	Densidad (%)	Densidad (g/cm ³)
1A	1198	40	37,0	21,5	39,0	17,5	43,8	0,44
2	1158	40	36,5	21,5	39,0	17,5	43,8	0,44
3	1227	40	40,0	21,5	37,0	15,5	38,8	0,39
4	1220	40	38,0	21,5	38,0	16,5	41,3	0,41
5	1247	40	39,0	21,5	36,0	14,5	36,3	0,36
6	1330	40	40,0	21,5	35,5	14,0	35,0	0,35
7	1411	40	39,0	21,5	35,0	13,5	33,8	0,34
8	1484	38	38,0	21,5	34,0	12,5	32,9	0,33
9	1528	40	40,0	21,5	36,0	14,5	36,3	0,36

Nota: *: U.A.M. es la Unidad Arbitraria de Masa medida con el dinamómetro del taladro Monte Rosa en la escala en pulgadas.

** : La densidad se estima con la prof. exterior, la prof. interior es solo de referencia.

Tabla 7.3.2-B. Densidad de la capa superior de 55,4", vale decir 140,7 cm de profundidad (excepto donde se indica) obtenida mediante taladro Monte Rosa con 2 secciones de tubo enterradas paricalmente en 2014. Las balizas coinciden con las posiciones medidas mediante GPS diferencial indicadas en la Tabla 6.2.1-B. La densidad promedio para las 9 balizas es de 0,44 g/cm³.

Baliza	Cota (m s.n.m.)	Prof. exterior (")	Prof. interior (" de nieve)	Peso tubo vacío (U. A. M.)	Peso con muestra (U.A.M.)	Peso neto muestra (U.A.M.)	Densidad (%)	Densidad (g/cm ³)
1	1196	55,4	53,9	22,0	50,5	28,5	51,4	0,51
2	1157	55,4	51,9	22,0	46,0	24,0	43,3	0,43
3	1225	55,4	51,9	22,0	46,0	24,0	43,3	0,43
4	1219	55,4	53,9	22,0	45,0	23,0	41,5	0,42
5	1247	55,9	50,4	22,0	46,5	24,5	43,8	0,44
6	1329	55,4	50,4	22,0	44,5	22,5	40,6	0,41
7	1409	55,4	49,4	22,0	46,5	24,5	44,2	0,44
8	1483	55,9	52,9	22,0	46,0	24,0	42,9	0,43
9	1527	57,4	54,0	22,0	45,5	23,5	40,9	0,41

Nota: *: U.A.M. es la Unidad Arbitraria de Masa medida con el dinamómetro del taladro Monte Rosa en la escala en pulgadas.

** : La densidad se estima con la prof. exterior, la prof. interior es solo de referencia. Se aprecia que las densidades promedio para 2014 ($0,44 \text{ g/cm}^3$) son un 16% mayor que en 2013 ($0,38 \text{ g/cm}^3$).

Al comparar los datos de densidad obtenidos con el Monte Rosa en 2013 y los datos obtenidos en los perfiles estratigráficos en 2013 (ver Tabla 8.2-B), se observa que la densidad estimada con el Monte Rosa es bastante mayor a la densidad promedio en el primer metro estimada en los perfiles. Se asume entonces que el error se asocia al método Monte Rosa, y se decidió utilizar los valores estimados en el perfil estratigráfico para extrapolar la densidad de la capa superior de acumulación a la zona de la meseta, con la densidad promedio medida en los primeros 4 m.

Tabla 7.3.2-C. Comparación de densidades entre el método Monte Rosa y pozo estratigráfico en 2013.

Zona (Baliza/Torre)	Densidad Monte Rosa (g/cm^3)	Densidad pozo estratigráfico (g/cm^3)	% Diferencia (dens. P.E./dens. M.R)
Baliza 2/Torre 1	0,44	0,34	77%
Baliza 9/Torre 2	0,36	0,21	58%

7.4. EXTRAPOLACIÓN DE LA DENSIDAD A LA MESETA

La extrapolación de la densidad a la meseta se realizó asociando la densidad linealmente con la altitud, basado en los datos 2013 de los 2 pozos. La densidad promedio en los primeros 4 m en la Torre 1 es de $0,45 \text{ gr/cm}^3$ con una cota igual a 1160 m s.n.m. y la densidad promedio en los primeros 4 m en la Torre 2 es de $0,37 \text{ gr/cm}^3$ a una cota igual a 1530 m s.n.m. En la Fig. 7.4-A se presentan los datos y la ecuación lineal.

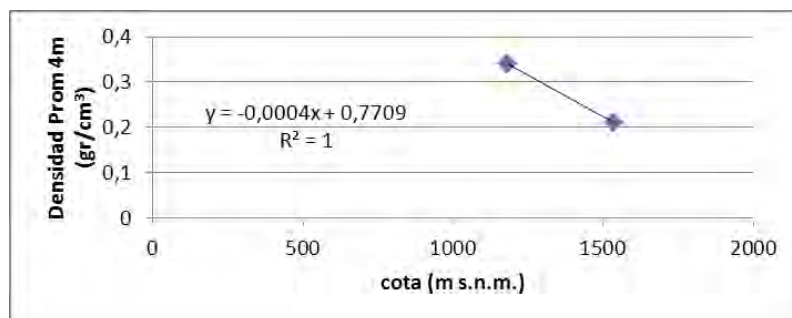


Figura 7.4-A. Ecuación lineal entre la densidad promedio en los primeros 4 m y la altitud basado en datos 2013.

Como fuente topográfica para la extrapolación de densidad se utilizó el modelo de elevación digital ASTER, con resolución espacial de 30 m de pixel.

En la Fig. 7.4-B se presenta la densidad promedio en los 4 primeros m extrapolada a la meseta, que corresponde a la zona sobre la línea de equilibrio y bajo los 1700 m s.n.m. ya que esta cota se considera el límite a los pies de las altas cumbres que emergen de Campo de Hielo Patagónico Norte. La línea de equilibrio (ELA) corresponde a la unión de las líneas de equilibrio de cada glaciar según Rivera (2007).

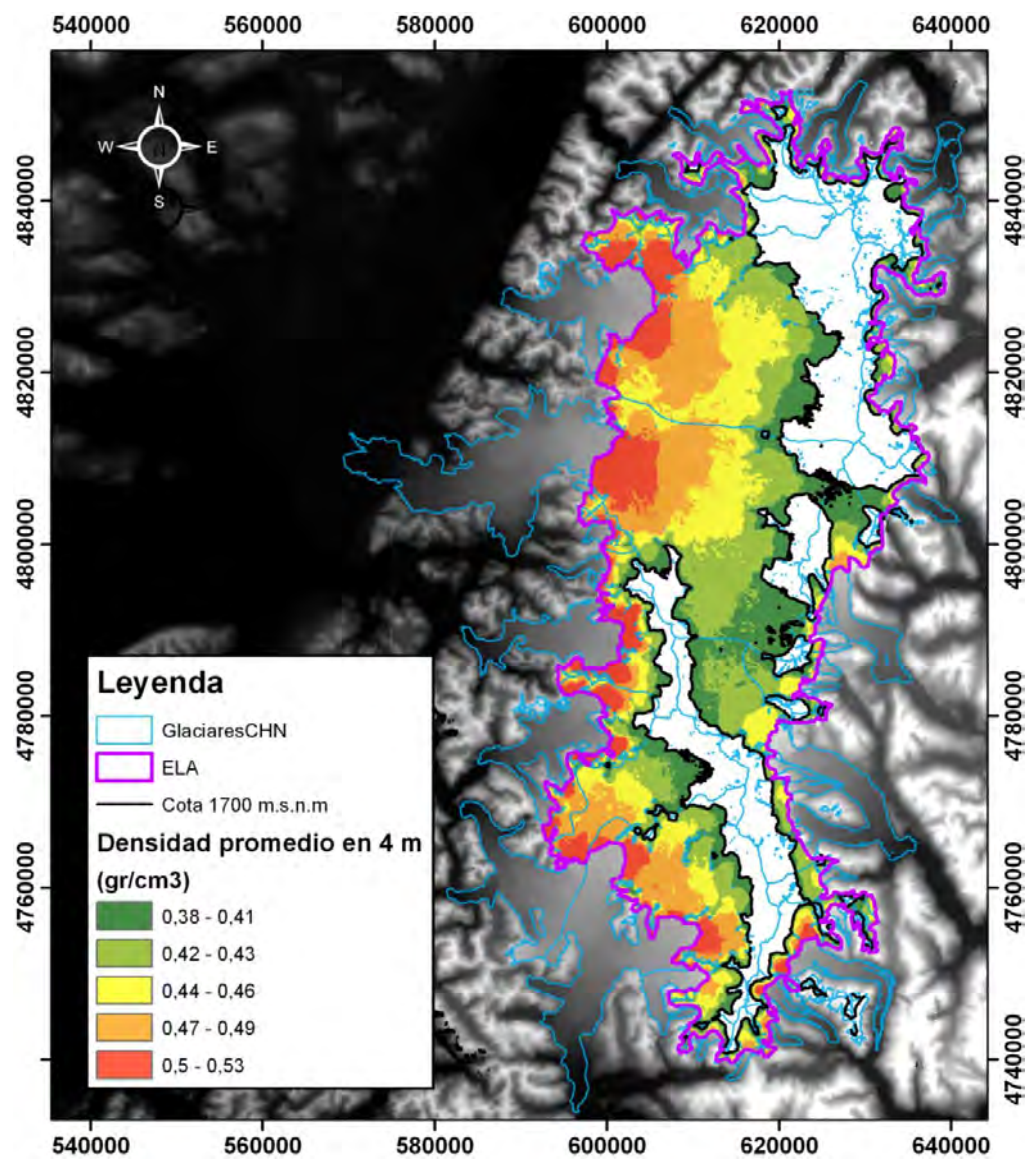


Figura 7.4-B. Densidad promedio de los 4 m superficiales, imagen de fondo ASTER GDEM.ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN EN LA MESETA

8. ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN EN LA MESETA

8.1. METODOLOGÍA

Para estimar la acumulación en la meseta de Campo de Hielo Patagónico Norte se utilizan los datos obtenidos en 2013 con el GPR en las transectas longitudinales y transversales. La profundidad de la acumulación anual promedio de los últimos 4 años (2009-2013) se estima como la profundidad del nivel freático obtenida a partir de los datos GPR de 2013 dividida por 4 ya que Yamada (1987) determinó, a partir de un testigo de neviza de 37,6 m, perforado a cota 1300 m de la zona de acumulación del glaciar San Rafael, que la edad de la neviza en el horizonte del nivel freático ubicado a 24,9 m, era de 4 años. Es preciso mencionar que el nivel freático ocurre en la transición neviza-hielo. Es decir, se asume que la nieve se demora 4 años en transformarse en hielo.

8.2. RESULTADOS

Los datos de profundidad promedio de acumulación de nieve se presentan en la Fig. 8.2-A. Se observa que la profundidad aumenta desde la zona más baja en el glaciar San Rafael hacia las mayores cotas en el centro para luego volver a disminuir hacia el sur a cotas más bajas. Los valores de profundidad de nieve anual basados en los datos GPR están comprendidos entre 2,3 m y 10,3 m. Como comparación, Yamada (1987) estimó una acumulación anual igual a 7 m de altura de nieve (1984-1985) a cota 1300 m.

Se realizó una extrapolación de los datos de profundidad de acumulación de nieve en la zona de la meseta del Campo de Hielo Patagónico Norte que corresponde a la zona sobre la línea de equilibrio o ELA (Rivera *et al.*, 2007) y bajo los 1700 m s.n.m. El límite 1700 m se estableció para evitar extrapolar a zonas de montaña con grandes pendientes donde los procesos eólicos pueden ser relevantes.

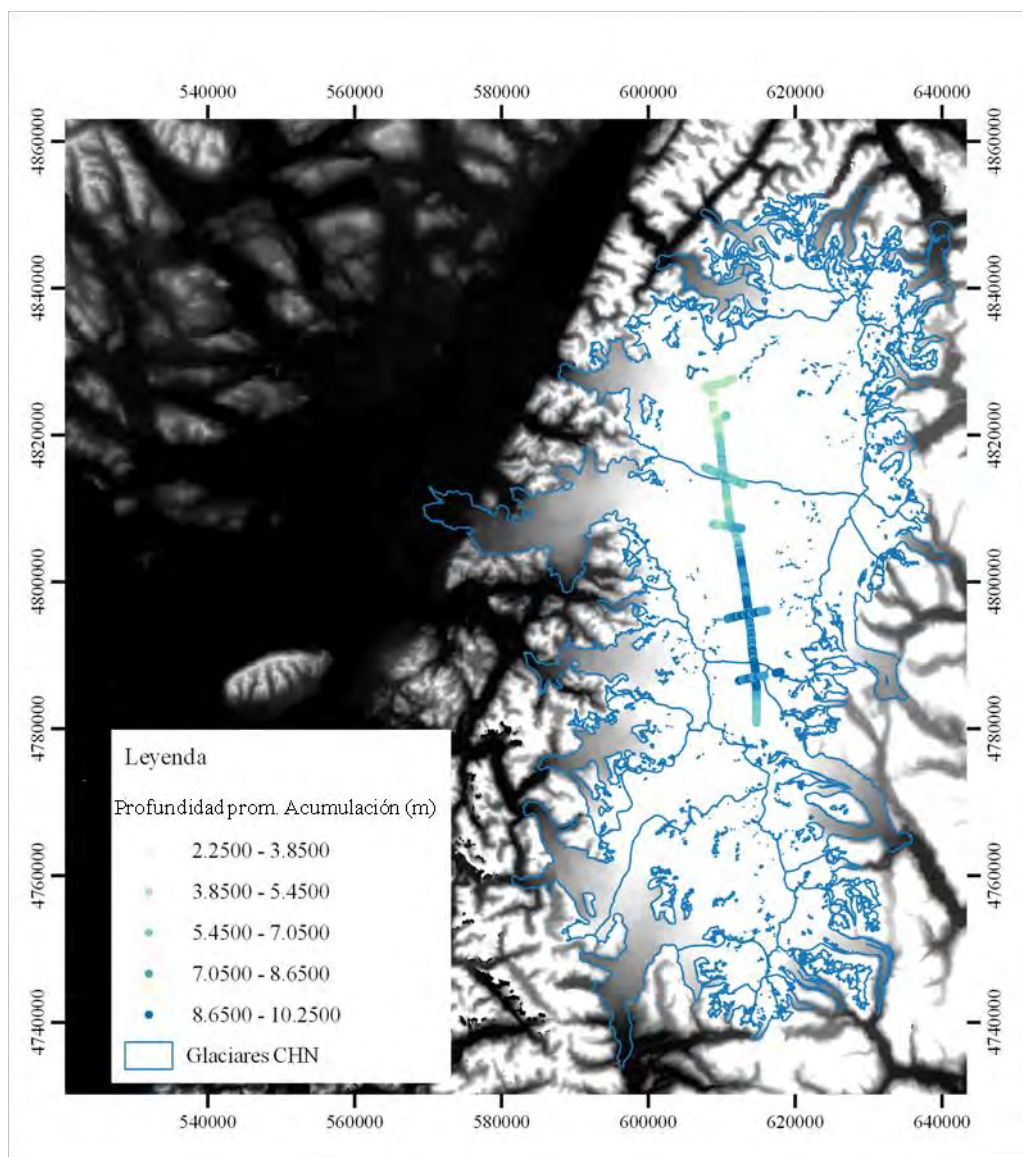


Figura 8.2-A. Profundidad promedio de la acumulación expresada como altura promedio de nieve anual (2009-2013), estimada con datos GPR, imagen de fondo ASTER GDEM.

Para interpolar la profundidad de la acumulación anual promedio en CHPN, se separan en dos zonas los datos de profundidad. Una zona desde el norte hasta la divisoria meridional del glaciar San Quintín y otra desde esta divisoria hacia al sur, con el fin de afinar la interpolación ya que la acumulación puede seguir patrones diferentes según la zona.

En cada zona se estimó una regresión lineal entre la altitud y la profundidad de

acumulación promedio de nieve, que se presenta en las Figs. 8.2-B y C.

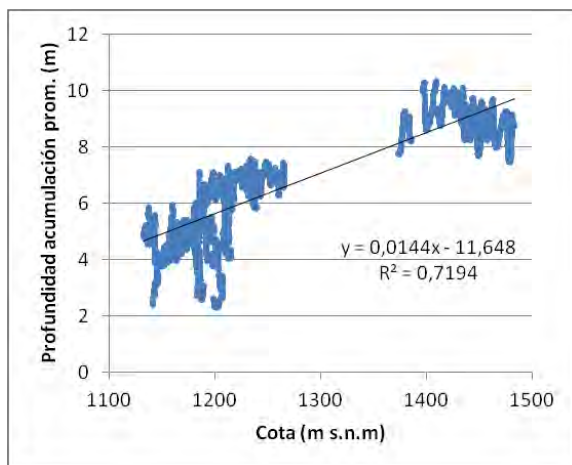


Figura 8.2-B. Correlación entre altitud y profundidad anual de acumulación de nieve en la zona norte.

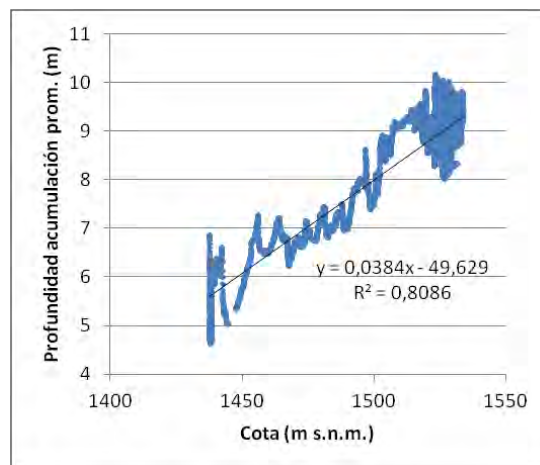


Figura 8.2-C. Correlación entre altitud y profundidad anual de acumulación de nieve en la zona sur.

Como fuente topográfica para la extrapolación de densidad se utilizó el modelo de elevación digital ASTER GDEM, con resolución espacial de 30 m.

En la Figura 8.2-D se presenta el resultado de la extrapolación de la acumulación anual promedio de nieve entre los años 2009 y 2013, que representan los últimos 4 años de acumulación, reflejados por el estrato de nieve y neviza que existe sobre la napa freática detectada por el radar. Se observa que la línea de equilibrio (1292 m s.n.m.) en la zona sur, estimada con la extrapolación de la acumulación anual promedio, se encuentra en general por sobre la ELA estimada por Rivera *et al.* (2007), ver Tabla 8.2-A.

Tabla 8.2-A. Cotas de la ELA en los glaciares de la zona sur, según Rivera *et al.* (2007).

Glaciares Zona Sur	ELA m s.n.m.
Benito	908
HPN1	959
Acodado	1014
Steffen	1074
HPN4	1177
U2	1136
U3	1147
Pared Sur	975
Pared Norte	1025
Arco	1248
Colonia	1302

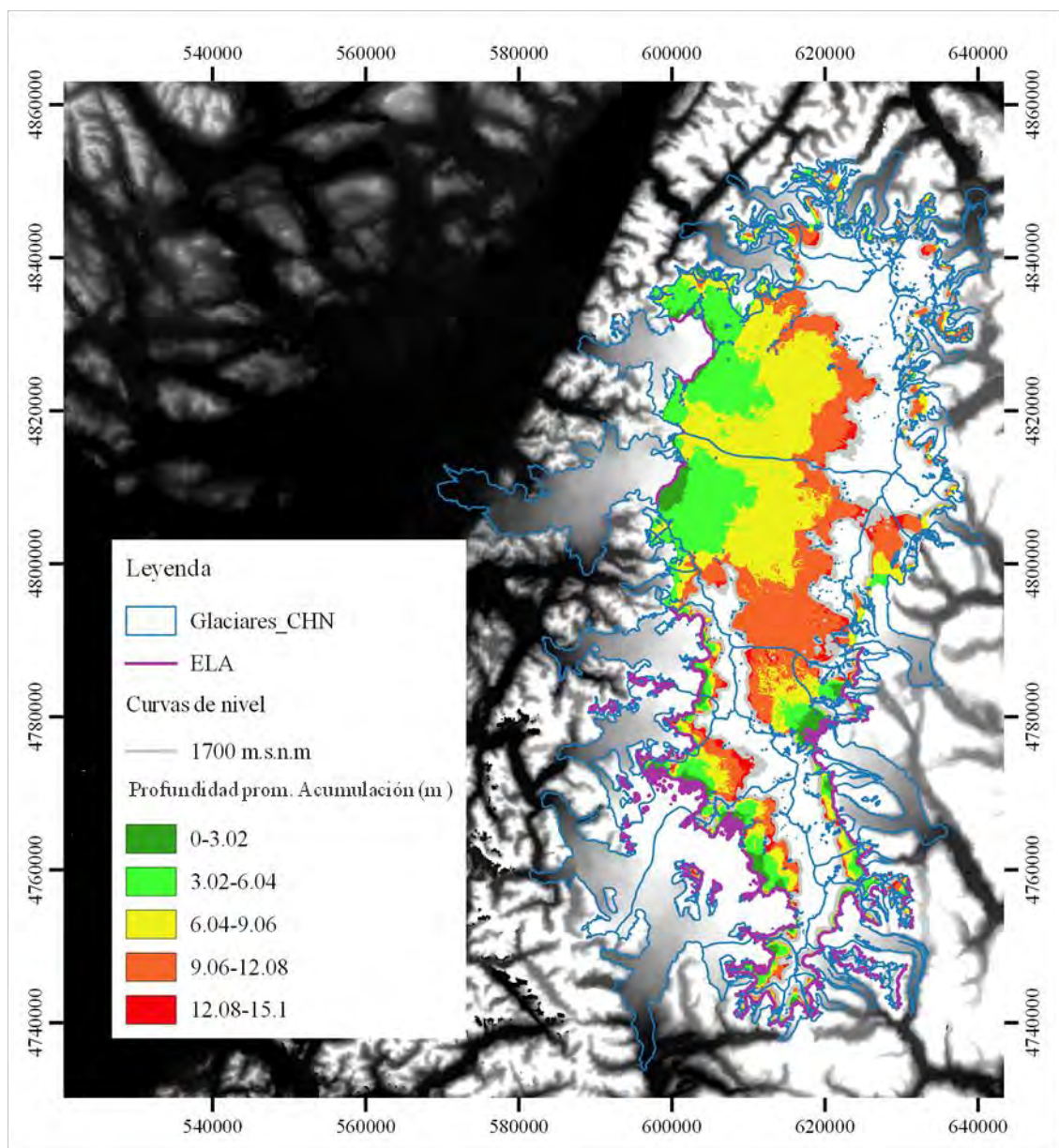


Figura 8.2-D. Acumulación promedio (2009-2013) de altura de nieve (m) en la meseta de CHPN, imagen de fondo ASTER GDEM.

Para estimar la acumulación en m eq.a. se utiliza la densidad promedio en los primeros 4 m extrapolada en la meseta, la cual se supone igual a la densidad de la capa anual. En la Fig. 8.2-E se presenta la acumulación estimada en la meseta en m eq.a. La acumulación es 4,0 m eq.a. a los 1500 m s.n.m. en el glaciar San Rafael, similar a la acumulación o balance neto promedio entre 1975 y 2011 estimada por Shaefer *et al.* (2013), donde la

acumulación a los 1500 m s.n.m. es del orden de 4 m eq.a.

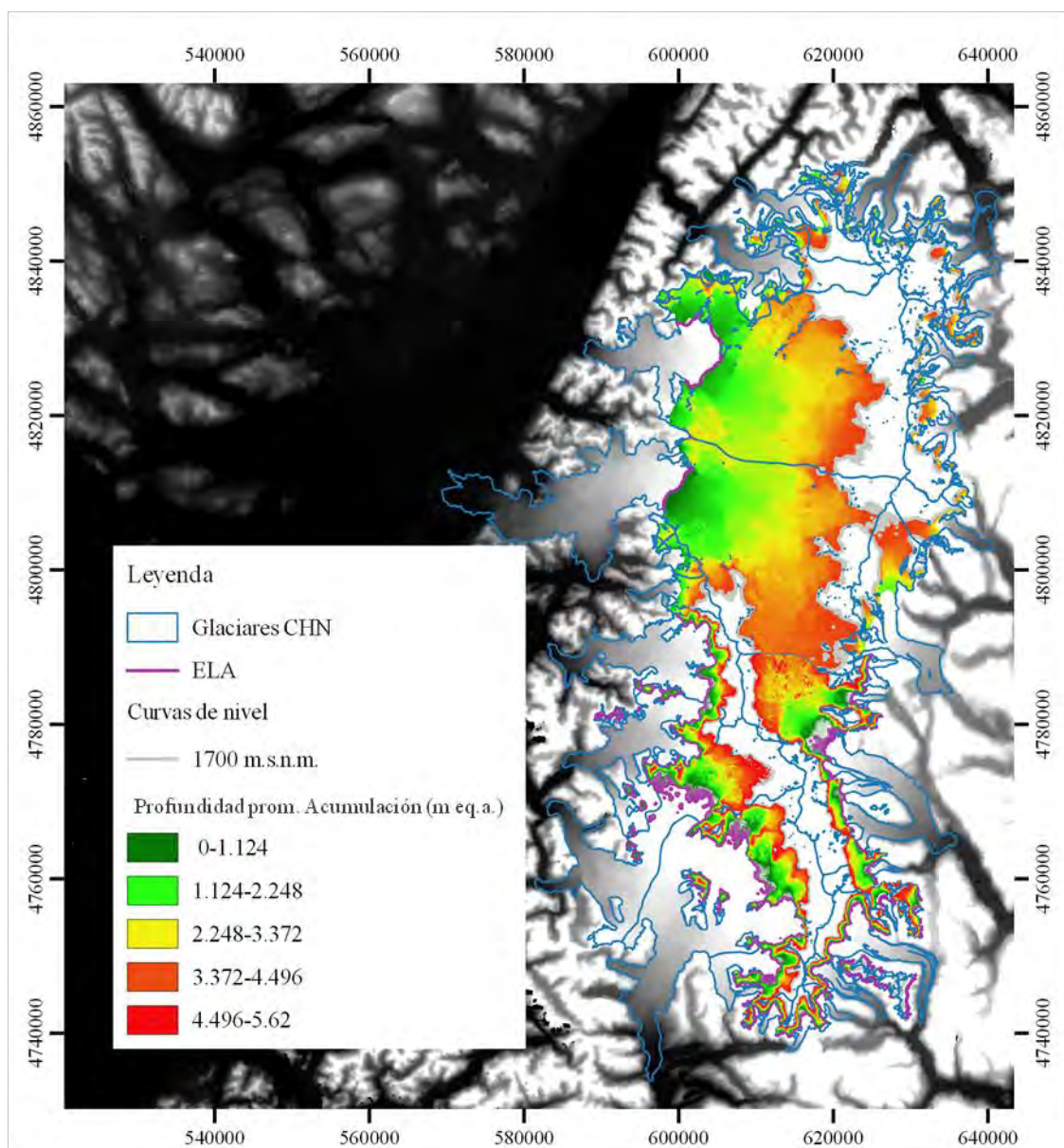


Figura 8.2-E. Acumulación promedio (2009-2013) en m eq.a. en la meseta de CHPN, imagen de fondo ASTER GDEM.

9. MONITOREO FOTOGRÁFICO

9.1. METODOLOGÍA

Se instalaron y / o se realizó mantención a 4 cámaras fotográficas automáticas para monitorear la actividad del frente de los glaciares San Rafael y Colonia. El sistema fotográfico automático utilizado en este proyecto es fabricado por Harbotronics, con cámaras fotográficas Canon Rebel XS con lente de 18-55 mm, un intervalómetro DigiSnap 2700 que actúa como disparador electrónico, baterías de litio de 11.1 V, 9 Ah y tarjetas de memoria SDHC de 16 GB y 32 GB, clase 10.

9.2. RESULTADOS GLACIAR SAN RAFAEL

En el glaciar San Rafael se programaron las cámaras para adquirir 3 fotografías diarias (para tener una buena duplicación y comprobar el funcionamiento), a las 13:00 h, 13:01 h y 13:02 hora local, que corresponde al mediodía solar aproximadamente. Las fotografías se almacenan en formato RAW y JPG (a la máxima resolución de 10 M píxeles aproximadamente para el formato RAW). Los archivos de cada fotografía son de 14 MB aproximadamente y cada cámara tiene una tarjeta de memoria de 32 GB que tiene capacidad suficiente para almacenar la información de un año.

9.2.1. 1ª Campaña San Rafael (2013)

La cámara 1 en el glaciar San Rafael se instaló en las coordenadas 588.945 E, 4.829.888 N, 170 m s.n.m. y la cámara 2 en las coordenadas 589.131 E, 4.829.719 N, 180 m s.n.m., con una separación de entre las 2 cámaras de 250 m. Ver Fig. 9.2.1-A.

Las cámaras se instalaron con la caja exterior fijada al tubo vertical de un trípode corto, fabricado en tubo de aluminio de 32 mm x 3 mm, anclado a la roca mediante placas de acero galvanizado con pernos de expansión de 5/16" x 2". La altura de las cámaras sobre el terreno fue de 80 cm. La instalación de las 2 cámaras en el frente del glaciar San Rafael se realizó el 15 de agosto de 2013.

El 21 de agosto se comprobó que la cámara 1 había dejado de funcionar el 19 de agosto y que perdía la información de la fecha en las fotos, por lo que fue retirada y enviada de vuelta a Santiago. El 13 de septiembre se reinstaló la cámara 1, debidamente reparada por parte de la DGA.

El 16 de agosto se verificó que la cámara 2 estaba funcionando correctamente. El 13 de septiembre se volvió a revisar la cámara, constatando que había dejado de funcionar el 30 de agosto. Se dejó funcionando nuevamente.

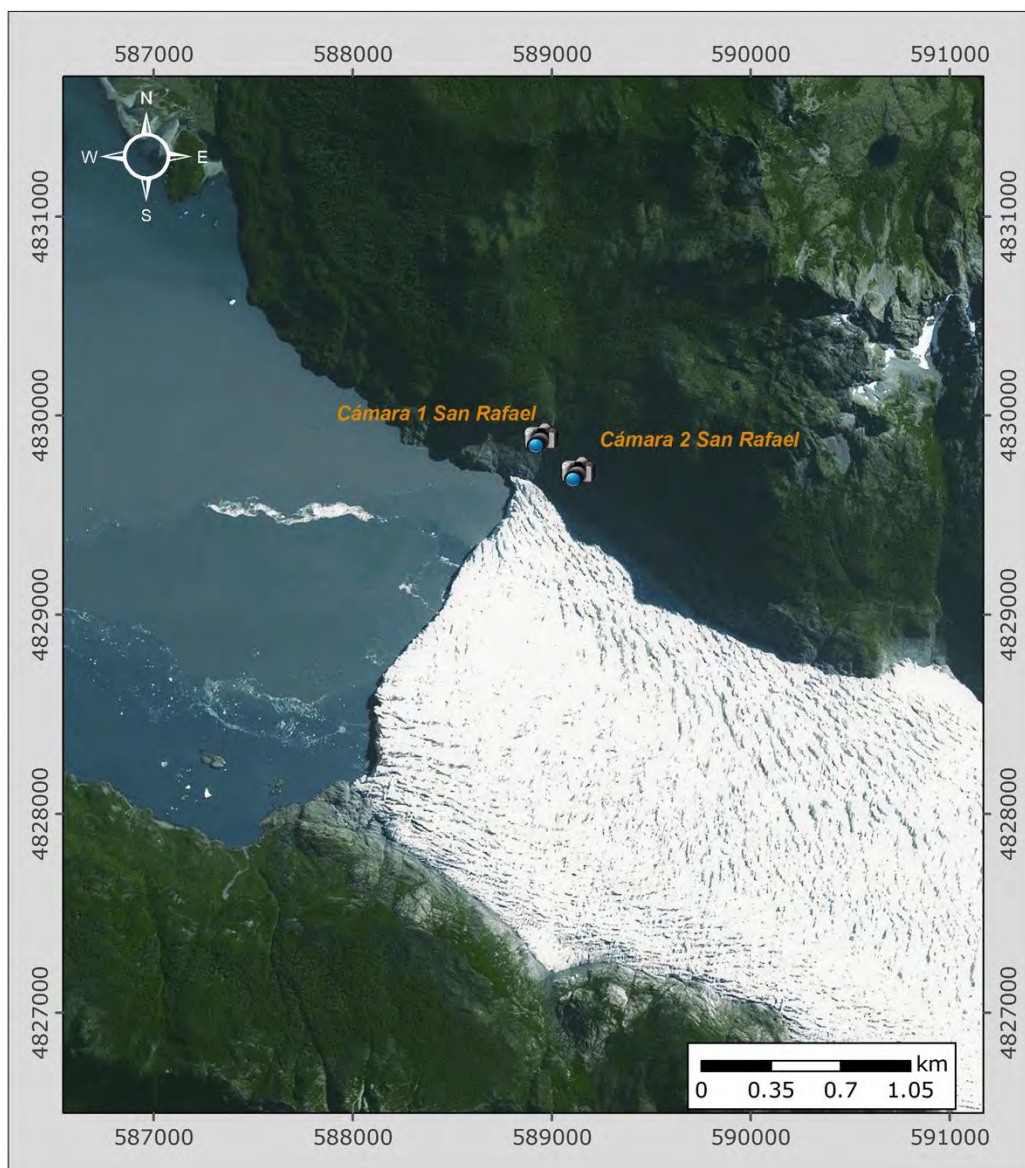


Fig. 9.2.1-A. Ubicación de las cámaras en el frente del glaciar San Rafael.

9.2.2. **2ª Campaña San Rafael (febrero 2014)**

El 23 de febrero de 2014 se realiza la segunda campaña a las cámaras del frente del glaciar San Rafael. Se accede al sitio de la cámara 2 y se procede a la descarga de datos y revisión de los mismos. Se encuentra que la caja de la cámara 2 contiene agua y que la cámara está inoperativa por lo que se procede a desinstalar para regresarla a Santiago según indicaciones de la DGA. Se constató que la cámara 2 había dejado de funcionar el 27 de octubre de 2013. Se accede a la cámara 1, cuya revisión indica que está funcionando y no presenta agua en su interior.

9.2.3. **3ª Campaña San Rafael (agosto 2014)**

El 16 de agosto de 2014 se realiza la última visita a la cámara 1 para mantención y descarga de datos, donde se observa que la cámara 1 había dejado de adquirir fotografías el 16 de abril de 2014. Se apagó el Digisnap y el sistema funcionó nuevamente, por lo que se dejó adquiriendo datos.

En las Figs. 9.2.3-B a D se presentan fotografías adquiridas por las cámaras. El registro de mantención de las cámaras y las respectivas fotos se ilustra en la Tabla 9.2.3-A. En los anexos digitales se presenta el registro disponible de fotografías de ambas cámaras.

Tabla 9.2.3-A. Registro de mantención y fotos de las cámaras 1 y 2 del glaciar San Rafael.

Cámara	Actividad	Fecha	Nº fotos	Bytes	Periodo registro	Obs.
Cámara 1	Instalación	15 Ago. 2013				Cámara se dejó funcionando correctamente
Cámara 1	Desinstalación	21 Ago. 2013				Cámara había dejado de funcionar el 19 Ago. 2013, se retiró y envió a Santiago a reparar
Cámara 1	Descarga fotos	21 Ago. 2013	25	150 MB	16/08/2013-19/08/2013	
Cámara 1	Reinstalación	13 Sep. 2013				Cámara fue reparada en Santiago y reinstalada en terreno
Cámara 1	Descarga fotos	14 Sep. 2013	23	147 MB	13/09/2013-14/09/2013	Fotos entregadas en Anexo Informe 2
Cámara 1	Mantención	23 Feb. 2014				Cámara funcionando correctamente
Cámara 1	Mantención	16 Ago. 2014				Cámara había dejado de funcionar el 16 Abr. 2014, se dejó funcionando nuevamente
Cámara 1	Descarga fotos	16 Ago. 2014	1244	7,5 GB	13/09/2013-12/04/2014 y 16/04/2014, 18/04/2014, 16/08/2014	

Cámara 2	Instalación	15 Ago. 2013				Cámara se dejó funcionando correctamente
Cámara 2	Mantención	16 Ago. 2013				Cámara funcionando correctamente
Cámara 2	Mantención	13 Sep. 2013				Cámara había dejado de funcionar el 30 Ago. 2013 y quedó funcionando nuevamente
Cámara 2	Descarga fotos	13 Sep. 2013	101	673 MB	16/08/2013-30/08/2013 y 13-14/09/2013	Fotos entregadas en Anexo Informe 2
Cámara 2	Desinstalación	23 Feb. 2014				Se detecta que la caja y la cámara están mojadas y se desinstala
Cámara 2	Descarga fotos	23 Feb. 2014	354	2,2 GB	16/08/2013-30/08/2013 y 13/09/2013-27/10/2013	La cámara había dejado de funcionar el 27 Oct. 2013



Figura 9.2.3-B. Fotografía adquirida por la Cámara 1, frente del glaciar San Rafael, el 13 de septiembre 2013 a las 10:26 AM hora local.



Figura 9.2.3-C. Fotografía adquirida por la Cámara 2, frente del glaciar San Rafael, el 16 de agosto de 2013, a las 15:38 hora local.



Figura 9.2.3-D. Fotografía adquirida por la cámara 1, frente del glaciar San Rafael, 16 de abril de 2014.

9.3. GLACIAR COLONIA

En el glaciar Colonia las cámaras se instalaron con la caja exterior fijada al tubo vertical de un trípode corto, fabricado en tubo de aluminio de 32 mm x 3 mm, anclado a la roca mediante placas de acero galvanizado con pernos de expansión de 5/16" x 2". La altura de las cámaras sobre el terreno es de 100 cm.

La programación de las cámaras del glaciar Colonia se realizó en Santiago, donde se comprobó su funcionamiento, con una captura de 3 fotografías diarias (para tener una buena duplicación y comprobar el funcionamiento), a las 12:00 h, 13:01 h y 14:00 hora local, alrededor del mediodía solar. Las fotografías se adquieren en formato RAW y JPG (a la máxima resolución RAW de 10 M píxeles aproximadamente). Los archivos de cada fotografía son de 14 MB aproximadamente y cada cámara se instaló con una tarjeta de memoria de 16 GB que tiene capacidad suficiente para guardar la información durante medio año.

9.3.1. **1ª Campaña Colonia (octubre 2013)**

En el frente del glaciar Colonia la instalación de las cámaras fotográficas se realizó el 27 de octubre de 2013. La cámara 1 se instaló en las coordenadas UTM E 633.871 y UTM N 4.765.786, la cámara 2 se instaló en las coordenadas UTM E 634.038 y UTM N 4.765.821, a 171 m de separación.

9.3.2. **2ª Campaña Colonia (febrero 2014)**

El 26 de febrero del 2014 se realiza la segunda mantención y descarga de datos en las cámaras en el frente del glaciar Colonia. Se revisa la cámara 1, donde se observa que el sistema se encuentra inoperativo por lo que se procede a desinstalar la cámara según instrucciones de la DGA. Se revisa la cámara 2 y se descargan datos, se encuentra que el sistema está inactivo pero que al reactivarlo y realizar pruebas el sistema vuelve a operar correctamente.

9.3.3. **3ª Campaña Colonia (septiembre 2014)**

La tercera y última campaña de mantención y descarga de datos se realizó el 4 de septiembre 2014. Se constató que la cámara 2 se había detenido el 20 de abril de 2014. Se descargaron los datos y se desinstaló la cámara.

En las Figs. 9.3.3-A a D se presentan fotografías tomadas por las cámaras instaladas en el frente del glaciar Colonia. El registro de mantención de las cámaras y las respectivas fotos se ilustra en la Tabla 9.3.3-A. En los anexos digitales se presenta el registro disponible de fotografías de ambas cámaras.

Tabla 9.3.3-A. Registro de mantención y fotos de las cámaras 1 y 2 del glaciar Colonia.

Cámara	Actividad	Fecha	Nº fotos	Bytes	Periodo de registro	Obs.
Cámara 1	Instalación	27 Oct. 2013	-	-		Cámara se dejó funcionando correctamente
Cámara 1	Descarga datos	28 Oct. 2013	2	13 MB	28/10/2013	
Cámara 1	Desinstalación	26 Feb. 2014				Cámara no funcionaba, se retiró y devolvió a Santiago
Cámara 1	Descarga datos	26 Feb. 2014	1319	7,9 GB	28/10/2013-14/02/2014	Se detecta que la cámara había dejado de funcionar el 14 Feb. 2014

Cámara 2	Instalación	27 Oct. 2013	-	-		Cámara se dejó funcionando correctamente
Cámara 2	Descarga datos	28 Oct. 2013	4	30 MB	28/10/2013	
Cámara 2	Mantención	26 Feb. 2014				La cámara está inactiva pero logra ser activada nuevamente
Cámara 2	Descarga datos	26 Feb. 2014	1043	7 GB	28/10/2013-02/01/2014	Se detecta que la cámara había dejado de funcionar el 2 de Ene. 2014
Cámara 2	Desinstalación	4 Sep. 2014				Cámara no estaba funcionando
Cámara 2	Descarga datos	26 Feb. 2014	544	3.7 GB	26/02/2014-20/04/2014	Se detecta que la cámara había dejado de funcionar el 20 Abr. 2014

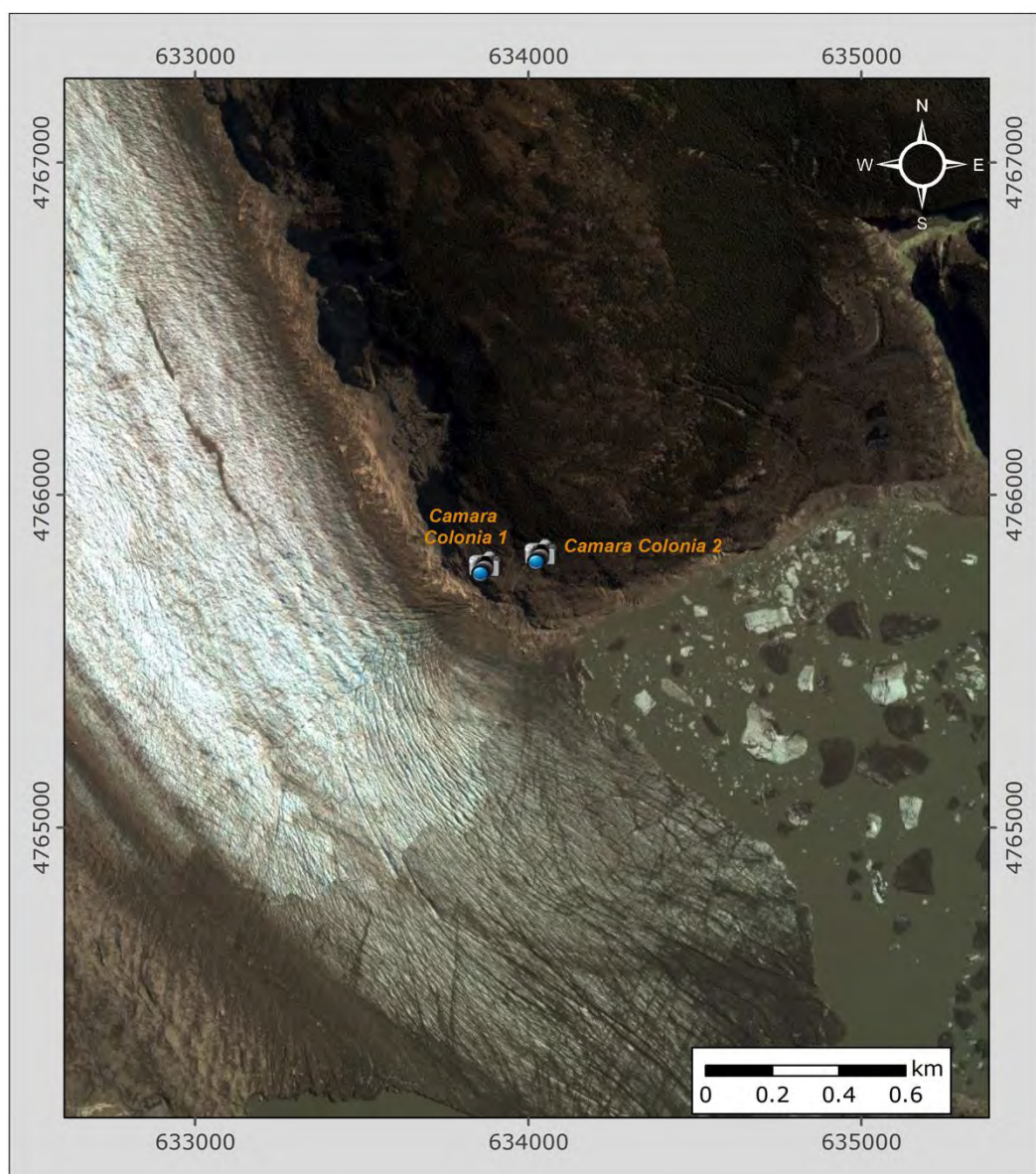


Figura 9.3.3-A. Ubicación cámaras en el frente del glaciar Colonia, aledaño al lago proglacial Colonia.



Figura 9.3.3-B. Fotografía adquirida por la cámara 1 en el glaciar Colonia, 28 de octubre de 2013 a las 13:41 h hora local, zona horaria GMT/UTC -4:00.



Figura 9.3.3-C. Fotografía adquirida por la cámara 2 en el glaciar Colonia, 28 de octubre de 2013 a las 14:51 hora local, zona horaria GMT/UTC -4:00.



Figura 9.3.3-D. Fotografía adquirida por la cámara 2 (retirada por Geoestudios el 4 de septiembre de 2014) en el frente del glaciar Colonia el 20 de abril del 2014.

10. MONITOREO DEL NIVEL DE AGUA

10.1. METODOLOGÍA LAGO PROGLACIAL COLONIA

En el lago proglacial Colonia se utilizó un sensor piezométrico para medir nivel de agua, con un datalogger Campbell. La primera descarga de datos del sensor de nivel se realizó el 28 de octubre de 2013. La estación de nivel de agua se encontraba en las coordenadas 18G 586.240 E, 4.834.438 N (Fig. 10.1-A), y el cable del sensor se encontraba dentro de un tubo PVC hidráulico fijo a la roca y el sensor se encuentra dentro un tubo PVC hidráulico colgando en el agua. El data logger de marca Campbell modelo 850 se encontraba dentro de una caja plástica Pelikan, fijada a una roca con alambre y cuerda. Al conectar el PC al datalogger nos percatamos que aparecía una advertencia de datos fuera de rango, y al descargar los datos se comprobó que solamente se contaba con tres datos válidos, con lo que se concluyó que el sensor estaba dañado y debía ser remplazado en la próxima campaña.



Figura 10.1-A. Ubicación del sensor de nivel en el lago proglacial Colonia, frente del glaciar Colonia.

En la segunda campaña al lago Colonia, entre el 21 de febrero y el 1 de marzo de 2014, se encontró la maleta del datalogger y la batería con mucha agua, se presumió que la maleta se encontraba sumergida en el agua producto de un efecto GLOF desde el lago Cachet II (ver Fig. 10.1-B). Se desinstaló el sensor y el datalogger y se comprobó el funcionamiento de la batería y el panel solar. A continuación se instaló el nuevo sensor de nivel y datalogger Campbell CR800 (ver Figs. 10.1-C y D).



Figura 10.1-B. Estado de la caja del datalogger conectado al sensor de nivel del lago proglacial Colonia el 25 de febrero de 2014.



Figura 10.1-C. Nuevo sensor de nivel instalado en el lago proglacial Colonia, 26 de febrero de 2014.



Figura 10.1-D. Caja con el datalogger nuevo del sensor de nivel del lago proglacial Colonia, 26 de febrero de 2014.

En la tercera campaña al lago Colonia el día 4 de septiembre 2014, se descargaron los datos de la estación de nivel y se desinstaló la estación completamente según indicaciones de la DGA (ver Fig. 10.1-E). Los datos descargados corresponden al periodo 27 de febrero 2014 al 4 de septiembre 2014.



Figura 10.1-E. 4 de septiembre de 2014, lago proglacial Colonia, desmantelamiento de la estación de nivel de agua.

10.2. RESULTADOS LAGO PROGLACIAL COLONIA

En las Fig. 10.2-A a F se presentan los valores horarios del nivel registrado en el lago Colonia y en la Tabla 10.2-A se presentan los promedios, máximos y mínimos mensuales.

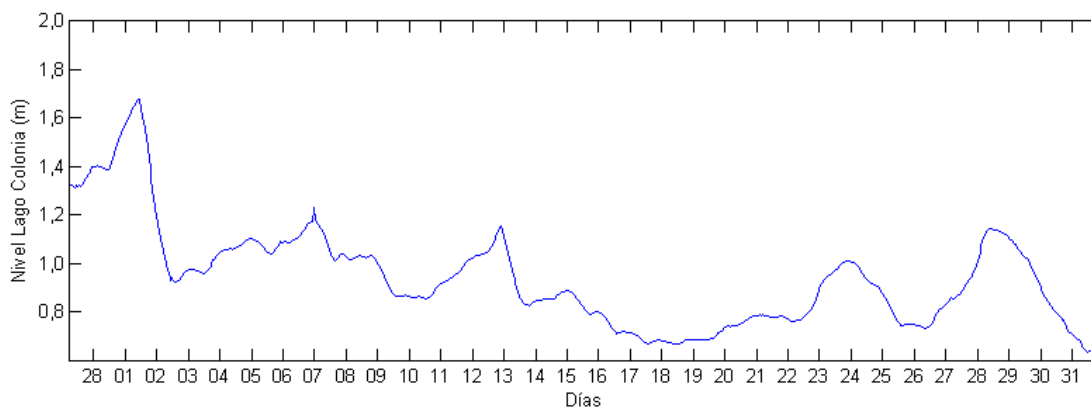


Figura 10.2-A. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, 27 de febrero al 31 de marzo de 2014.

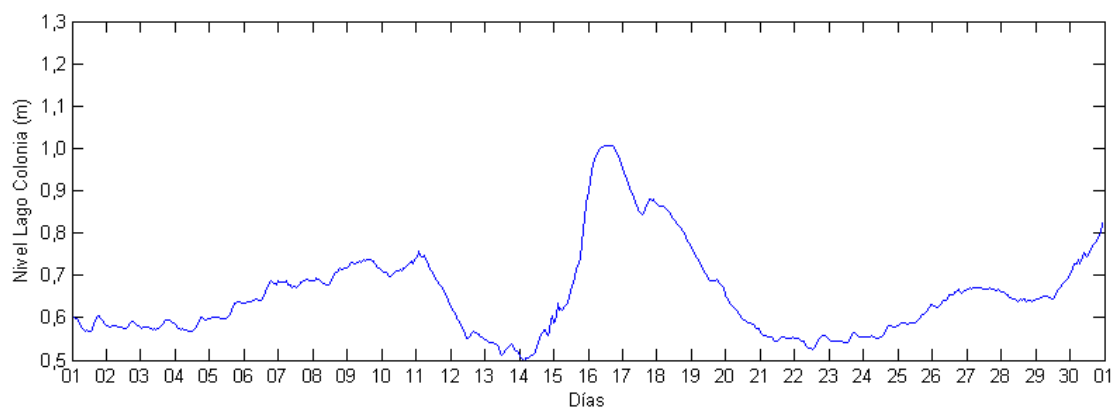


Figura 10.2-B. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, abril de 2014.

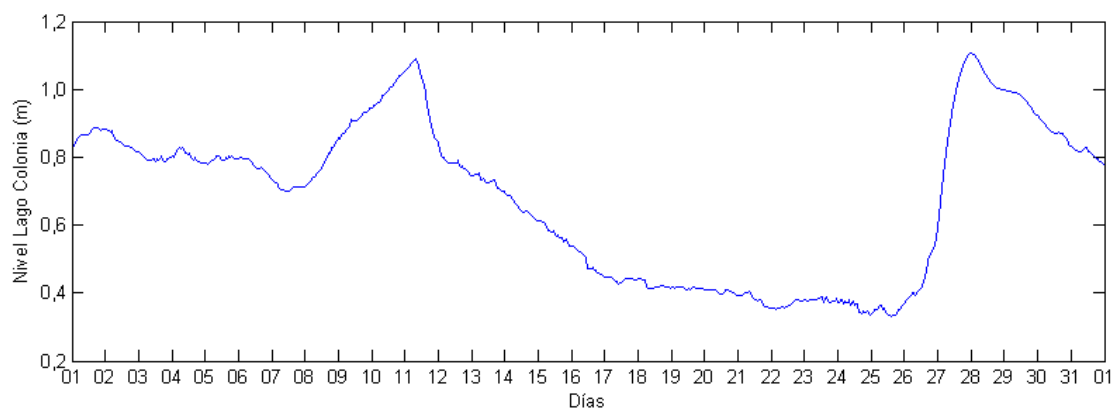


Figura 10.2-C. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, mayo de 2014.

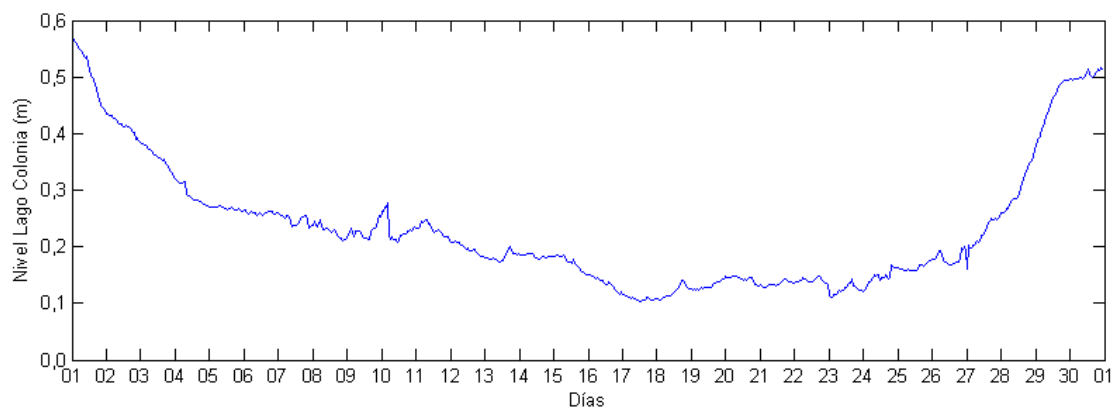


Figura 10.2-D. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, junio de 2014.

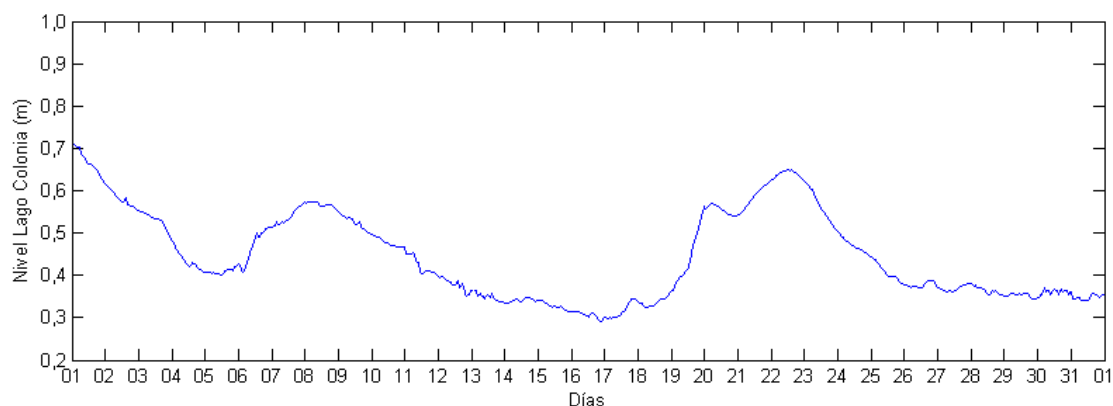


Figura 10.2-E. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia, julio de 2014.

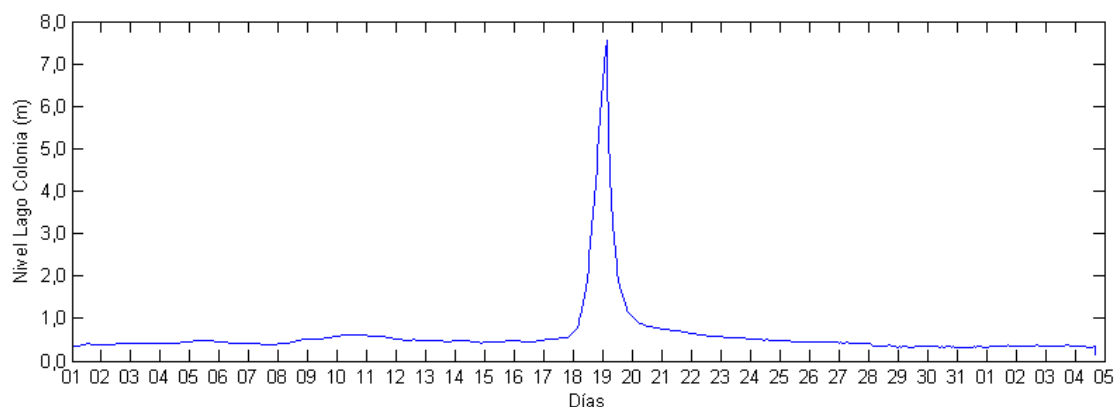


Figura 10.2-F. Niveles horarios estación lago proglacial Colonia del 1 de agosto al 4 de septiembre de 2014. El peak del 19 de agosto corresponde a un GLOF del lago Cachet II.

Tabla 10.2-A. Promedio, máximos y mínimos mensuales del nivel registrado en el lago proglacial Colonia, año 2014.

MES	PROMEDIO (m)	FECHA REGISTRO	MAX (m)	FECHA REGISTRO	MIN (m)
20 Feb. - 31 Mar.	0,941	01/03/2014 10:00	1,678	31/03/2014 4:00	0,604
Abril	0,655	16/04/2014 12:00	1,007	14/04/2014 03:00	0,500
Mayo	0,681	28/05/2014 0:00	1,106	25/05/2014 14:00	0,331
Junio	0,434	01/06/2014 0:00	0,773	17/06/2014 12:00	0,304
Julio	0,446	01/07/2014 0:00	0,714	16/07/2014 22:00	0,291
1 Ago. - 4 Sep.	0,604	19/08/2014 03:00	7,561	04/09/2014 17:00	0,133

Al analizar los niveles registrados en el lago proglacial Colonia se diferencian tres tipos de fenómenos distintos:

- Aumento de nivel en el rango, 1-10 cm en una hora, que están probablemente asociados a desprendimientos de témpanos.
- Aumento de nivel de más de 7 m el 19 de agosto de 2014, asociado al evento GLOF ocurrido en esa fecha (también visible en las fotografías de la cámara automática).
- Aumentos de nivel entre 0,5 y 1 m de algunos días que están probablemente relacionados a un aumento de nivel debido a fusión glaciaria y manto de nieve del entorno, desprendimiento de témpanos y precipitaciones, que luego de unos días es desaguado río abajo.
- Disminución paulatina del nivel del lago del orden de 0,5 m entre el fin del verano (marzo) y mediados del invierno (julio), debido probablemente a la reducción del derretimiento del glaciar.

10.3. METODOLOGÍA LAGUNA SAN RAFAEL

La DGA mantiene en la laguna San Rafael un sensor de nivel que mide las variaciones verticales de la columna de agua. Los datos son utilizados para analizar variaciones en la columna de agua, que está controlada por varios factores, incluyendo el desprendimiento de témpanos, la cantidad de agua de derretimiento que proporcionan los glaciares, las aguas lluvia y también las mareas.

En la laguna San Rafael la primera descarga de datos del sensor de nivel se realizó el 18 de agosto de 2013. El sensor se encontraba en las coordenadas 18G 586.243 E, 4.834.447 N (Fig. 10.3-A), instalado en el extremo del muelle dentro de un tubo PVC hidráulico. El data logger es marca Stevens, dentro de una caja plástica Pelikan junto a la batería (sin fijación), con presencia visible de humedad interior. Esta estación registra datos horarios de nivel de agua.

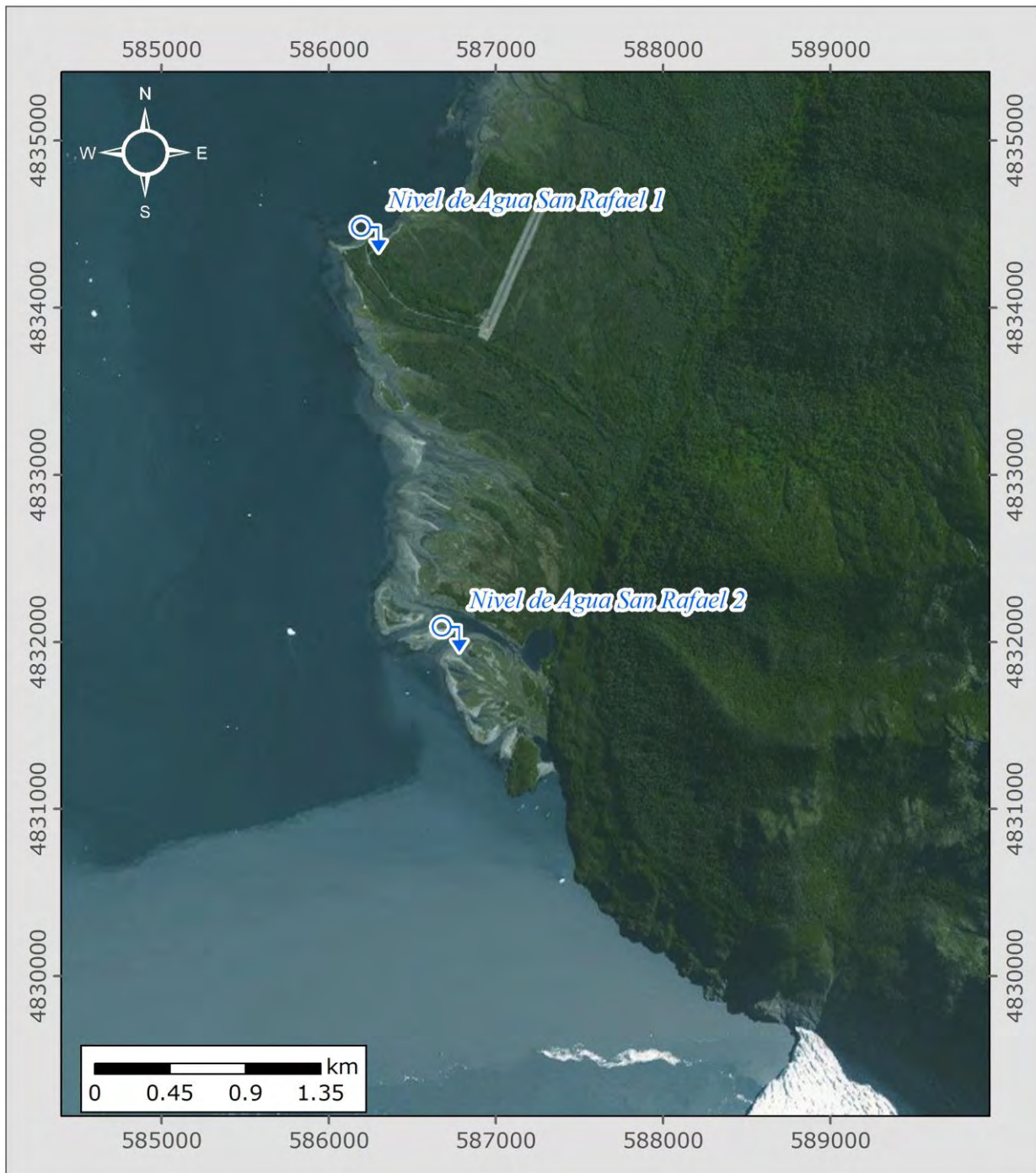


Figura 10.3-A. Ubicación del sensor de nivel de agua antiguo en el muelle de la laguna San Rafael (Nivel SLR 1) y el sensor de nivel nuevo (Nivel LSR 2) en una isla marginal de la laguna San Rafael.

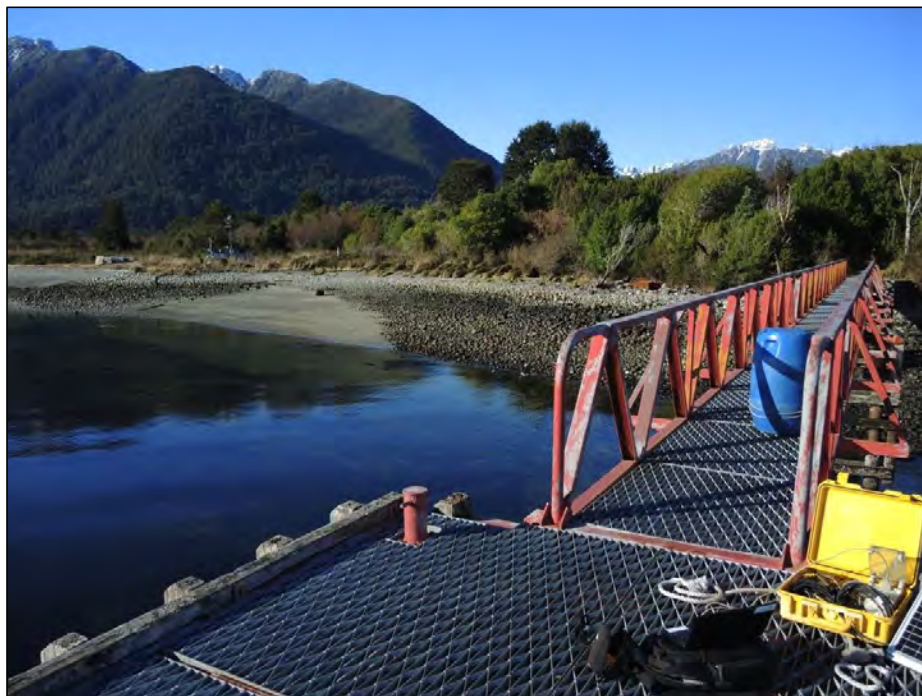


Figura 10.3-B. Muelle y lugar de instalación del datalogger del antiguo sensor de nivel de agua.



Figura 10.3-C. Datalogger y caja Pelikan junto al panel solar, de la antigua estación de nivel de agua.

La segunda descarga de datos de la estación de nivel ubicada en el muelle (que denominamos "antigua estación" puesto que se trasladó posteriormente, en 2014, a una isla de la laguna cerca del refugio CONAF) se realizó el 22 de febrero de 2014, obteniéndose los registros del periodo del 1 agosto de 2013 al 22 de febrero de 2014.

La tercera descarga de datos se realizó el 6 de septiembre de 2014, desde la nueva estación de nivel con datalogger Campbell CR800 dentro de una caja plástica Pelikan junto a la batería (con fijación), instalada en una isla marginal de la laguna San Rafael. Esta estación registra datos de nivel y temperatura del agua cada 10 minutos. En la Fig. 10.3-A se presenta la ubicación de la nueva estación de nivel de agua y en las Figs. 10.3-D y E se presenta una fotografía de la nueva estación de nivel de agua.

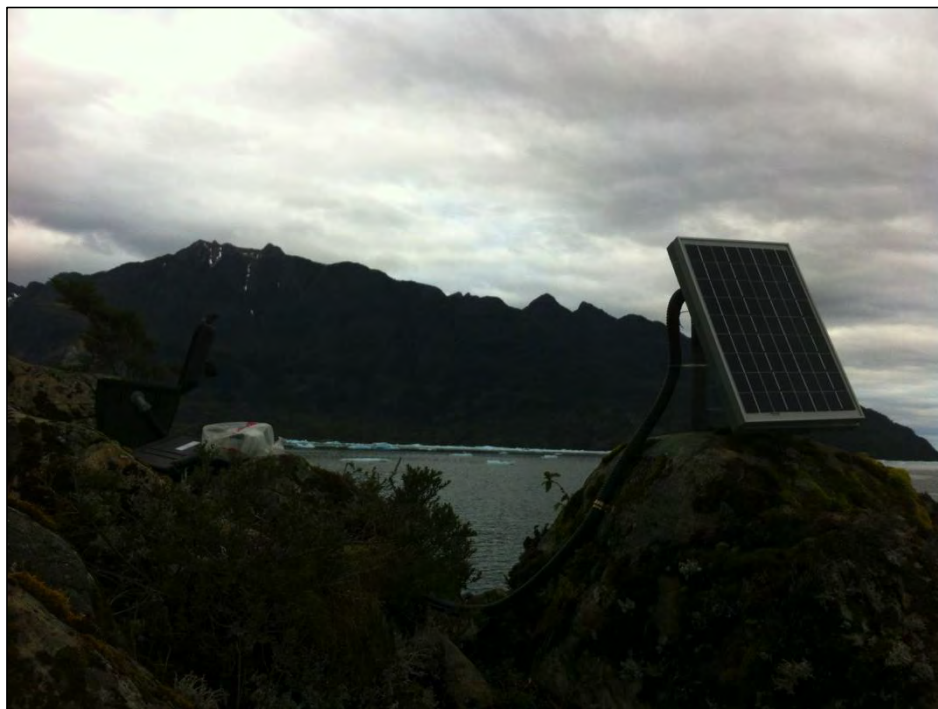


Figura 10.3-D. Panel solar y caja Pelikan, nueva estación de nivel de agua.



Figura 10.3-E. datalogger y caja Pelikan, nueva estación de nivel de agua.

10.4. RESULTADOS LAGUNA SAN RAFAEL

En las Figs. 10.4-A a V se presentan los datos horarios medidos en la antigua estación de nivel de agua, y en la Tabla 10.4-A se presentan los valores promedio, máximos y mínimos mensuales de los niveles medidos en la antigua estación.

En las Figs. 10.4-W a AA se presentan los datos horarios medidos en la nueva estación de nivel de agua y en la Tabla 10.4-B se presentan los valores promedio, máximos y mínimos mensuales de los niveles medidos en la nueva estación.

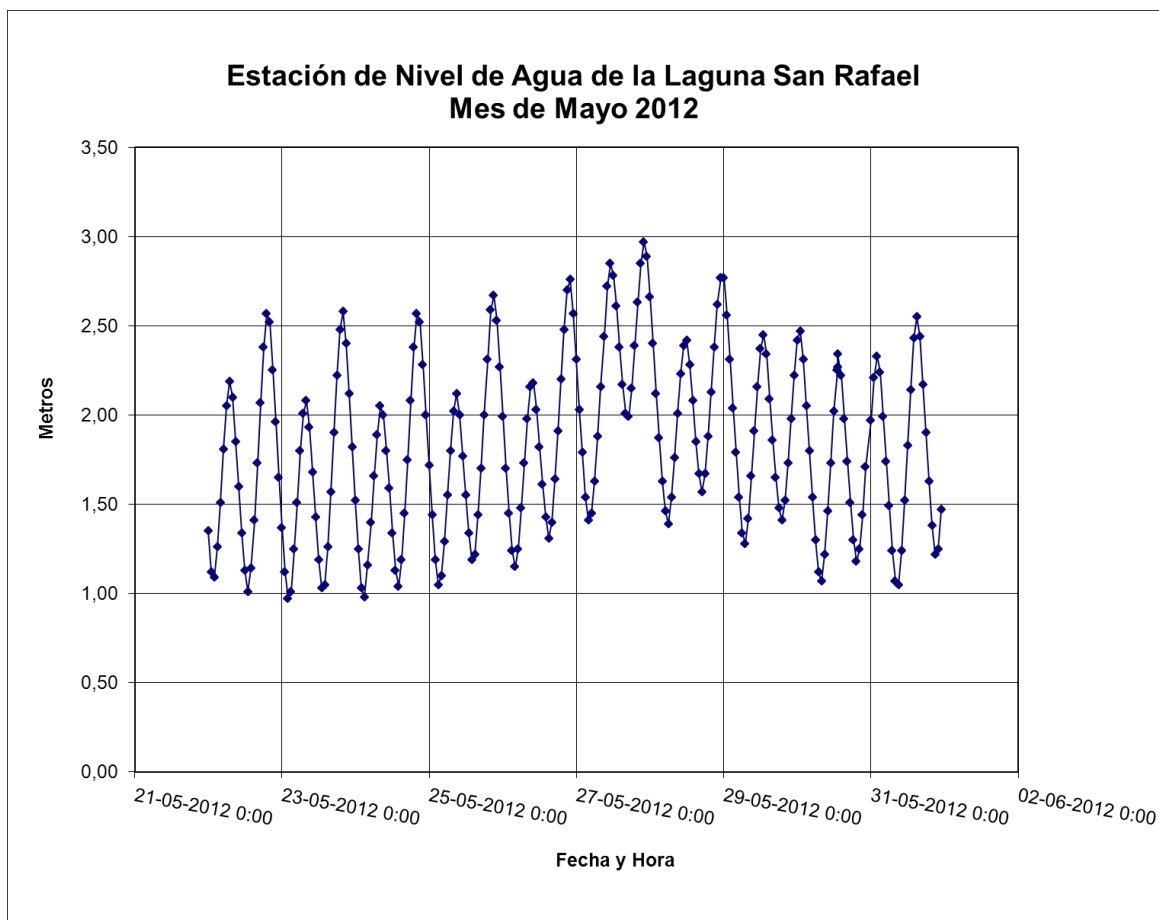


Figura 10.4-A. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de mayo 2012.

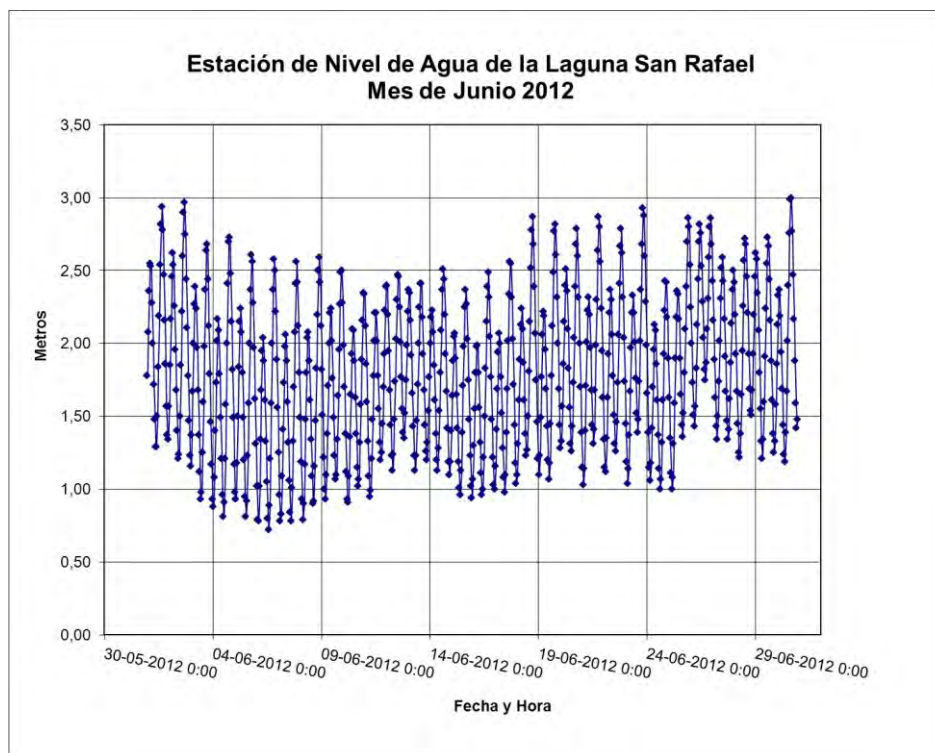


Figura 10.4-B. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de junio 2012.

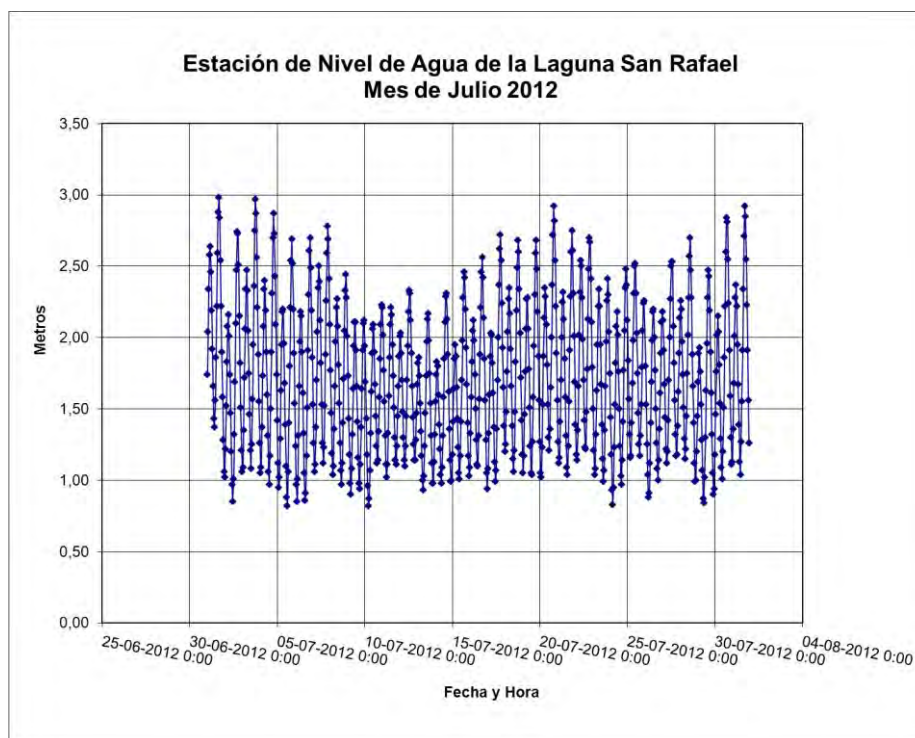


Figura 10.4-C. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de julio 2012.

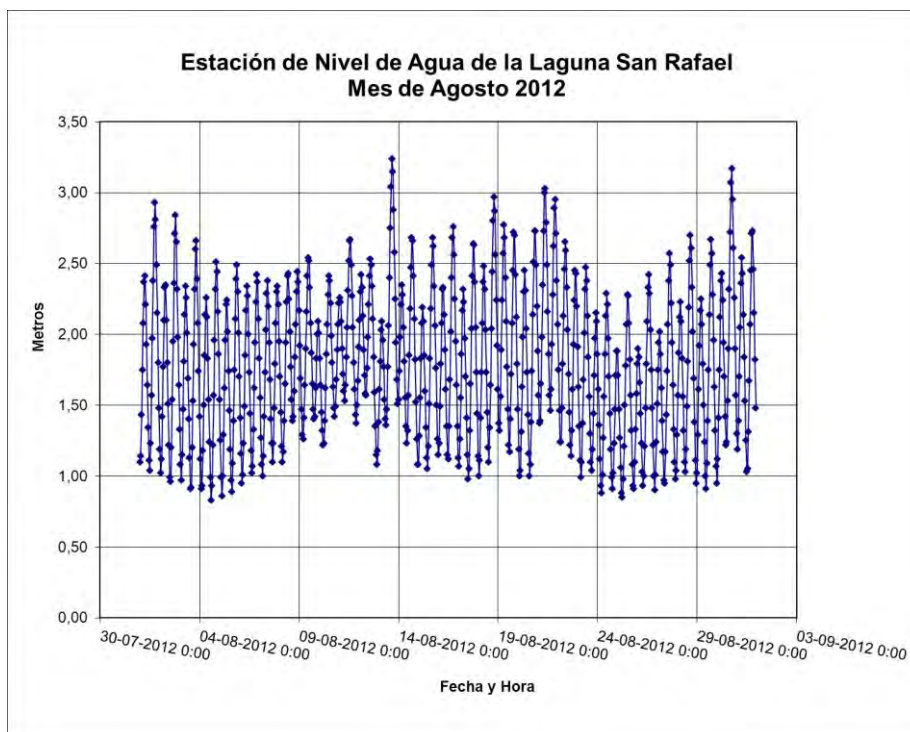


Figura 10.4-D. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de agosto 2012.

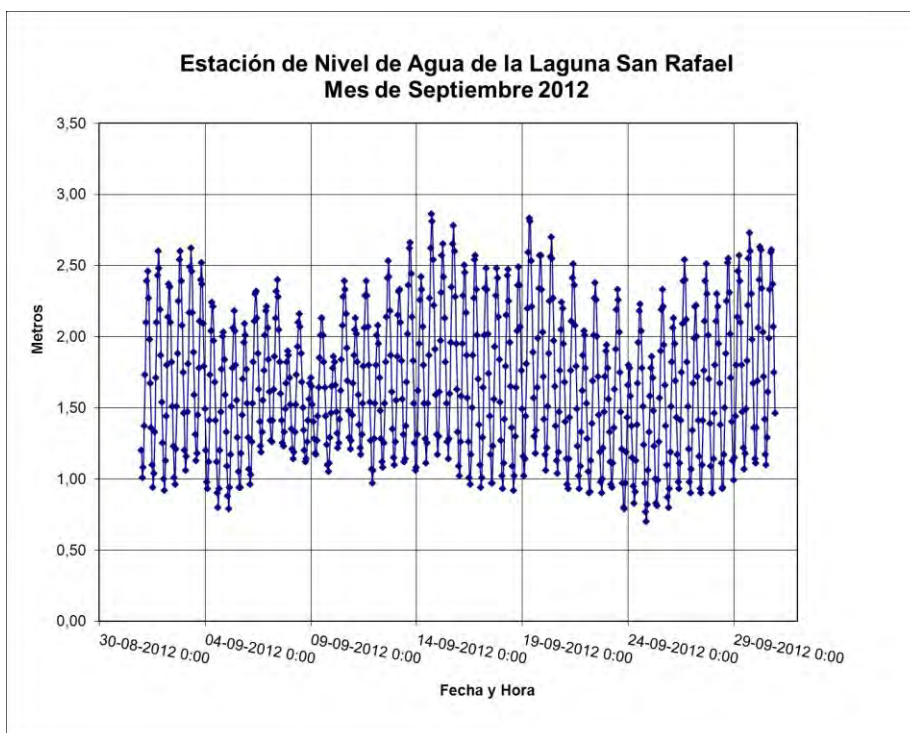


Figura 10.4-E. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de septiembre 2012.

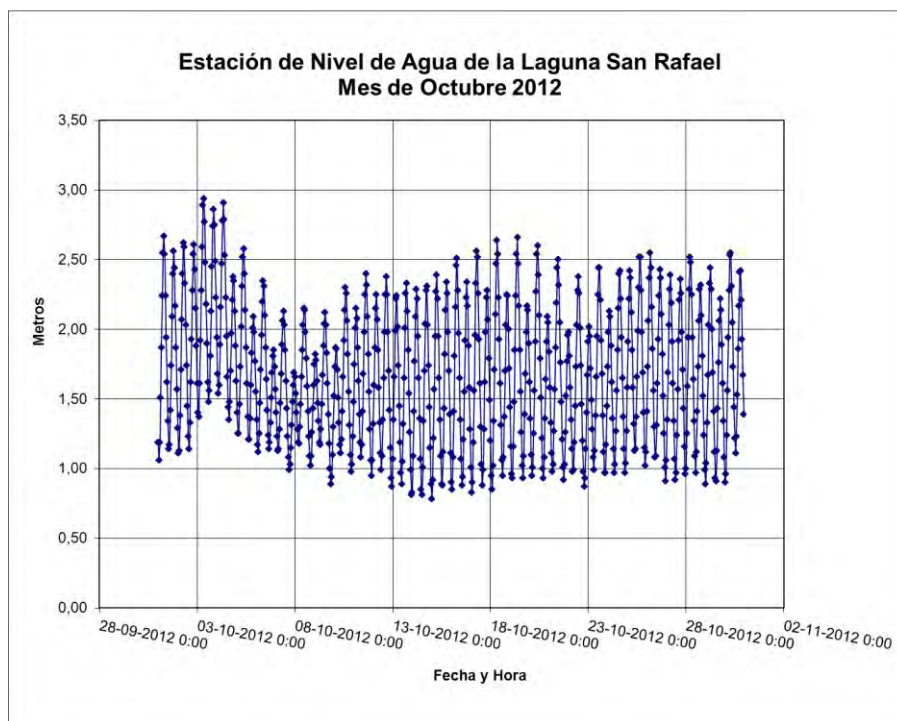


Figura 10.4-F. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de octubre 2012.

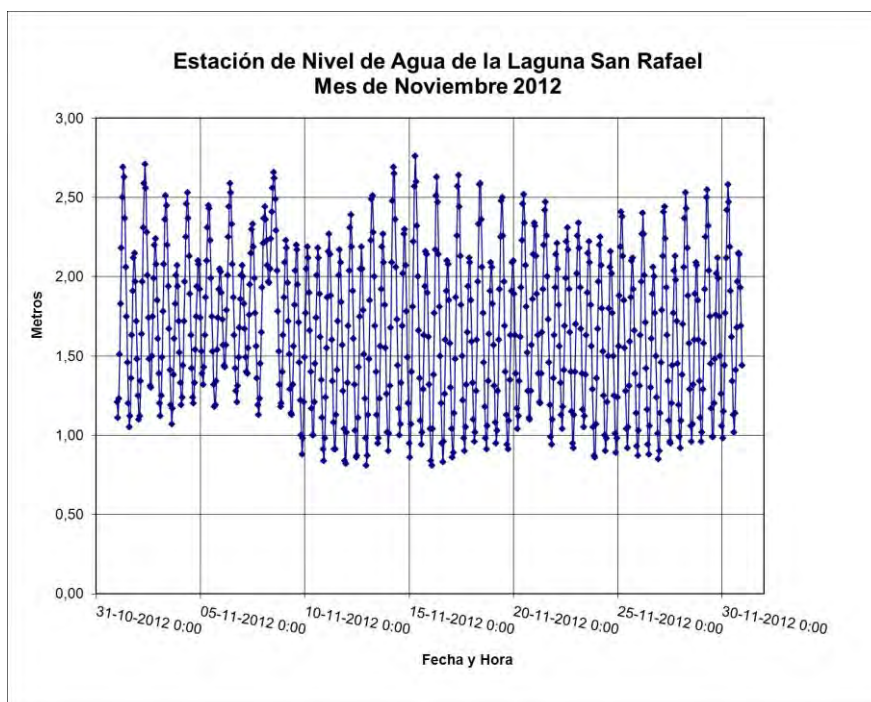


Figura 10.4-G. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de noviembre 2012.

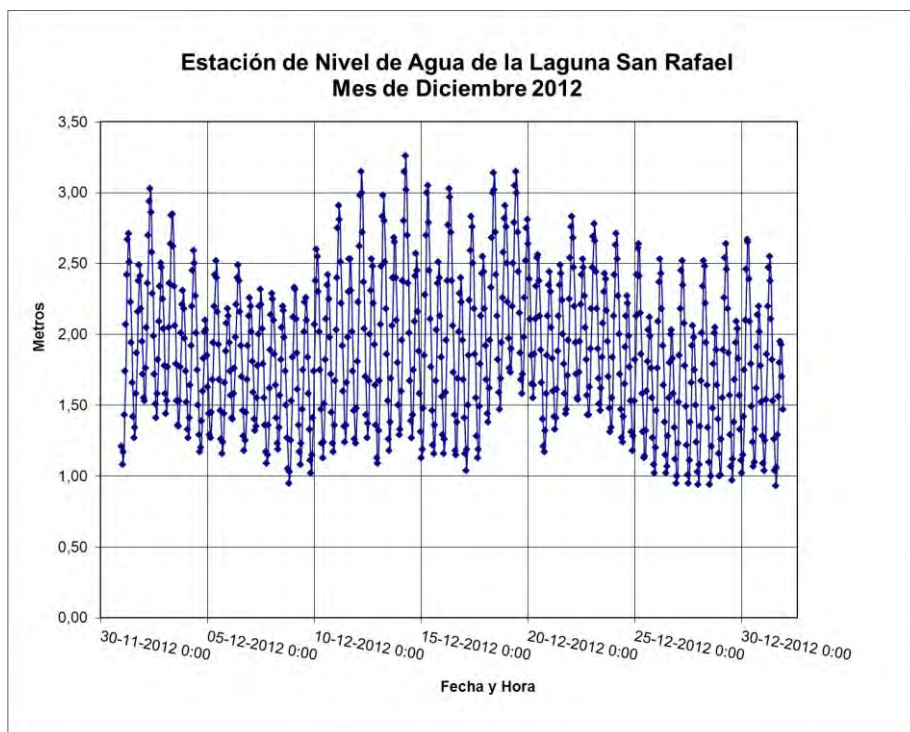


Figura 10.4-H. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de diciembre 2012.

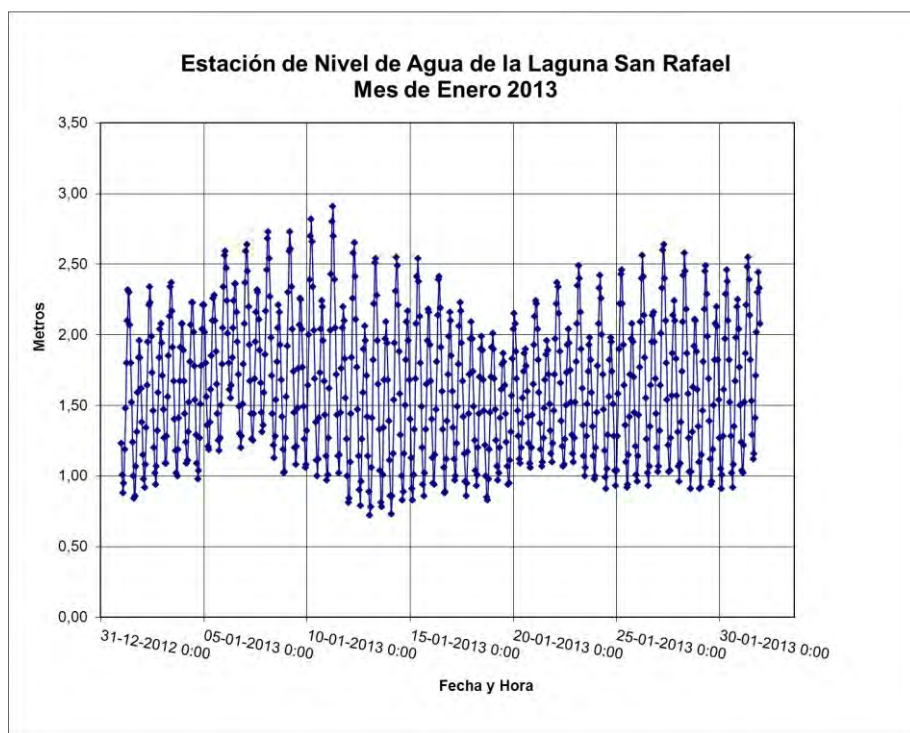


Figura 10.4-I. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de enero 2013.

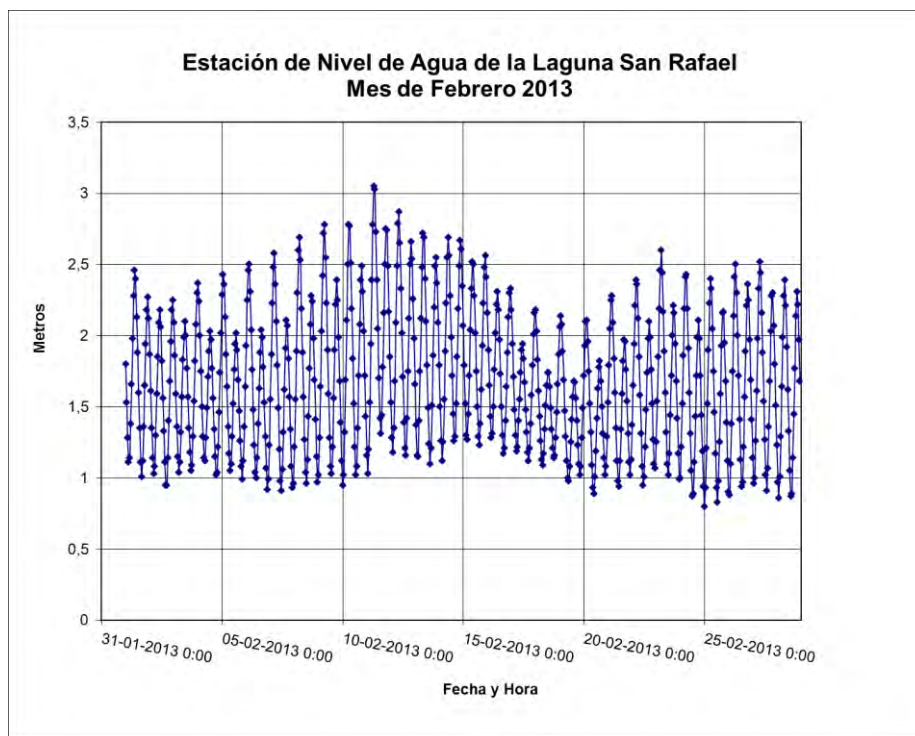


Figura 10.4-J. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de febrero 2013.

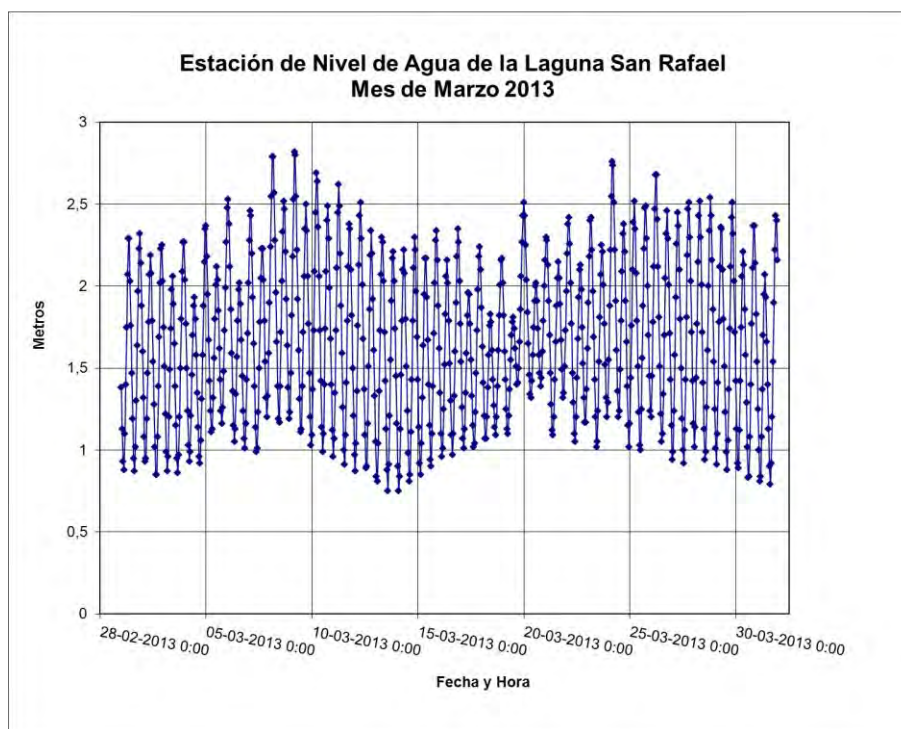


Figura 10.4-K. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de marzo 2013.

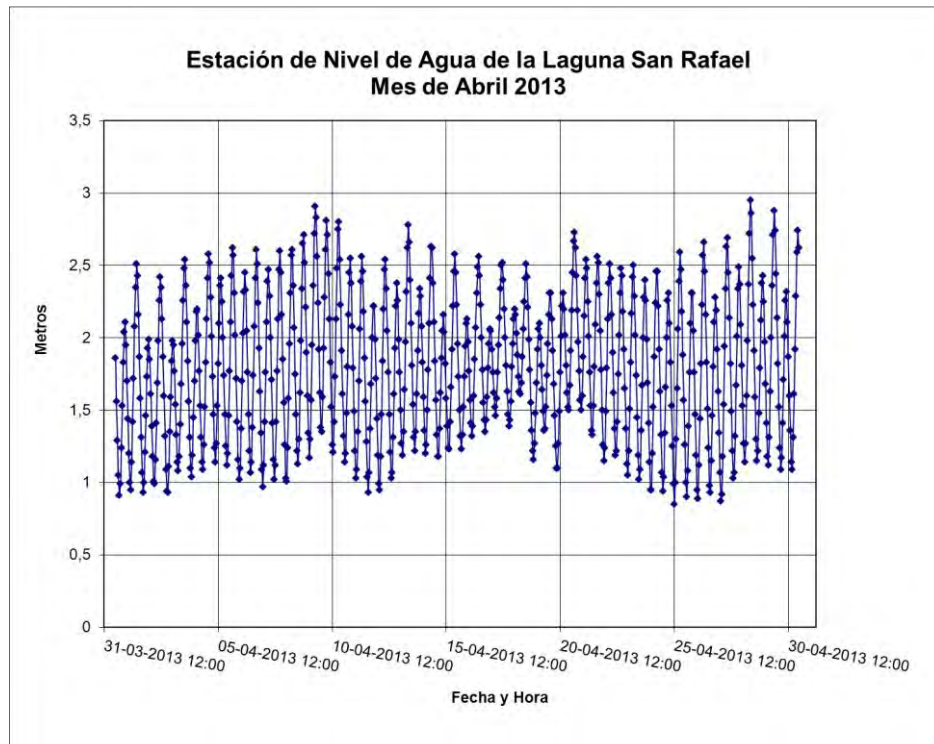


Figura 10.4-L. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de abril 2013.

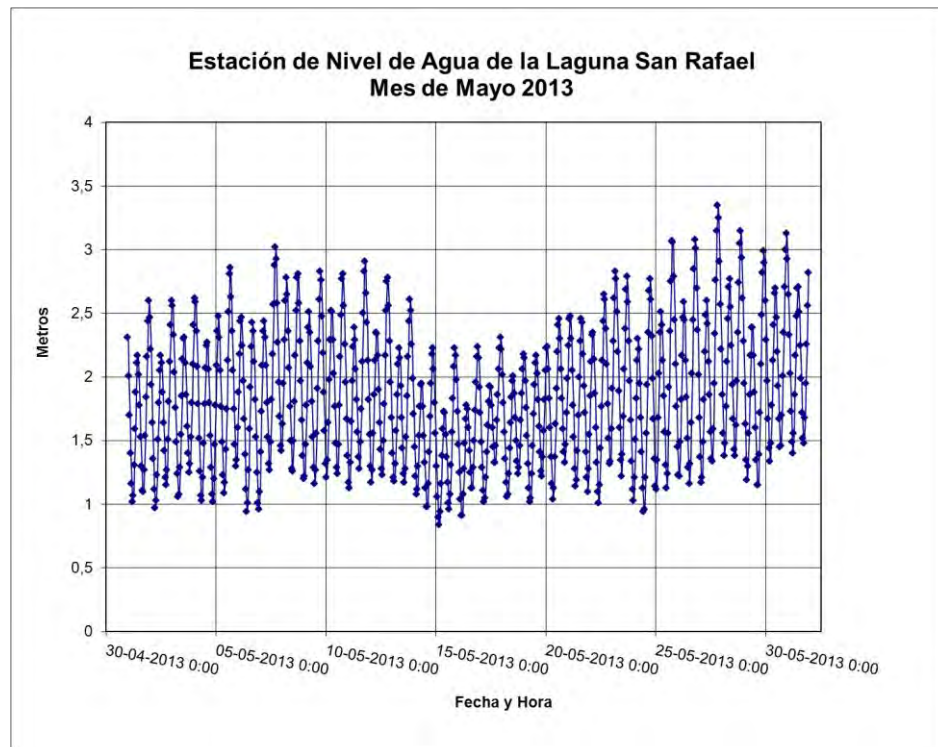


Figura 10.4-M. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de mayo 2013.

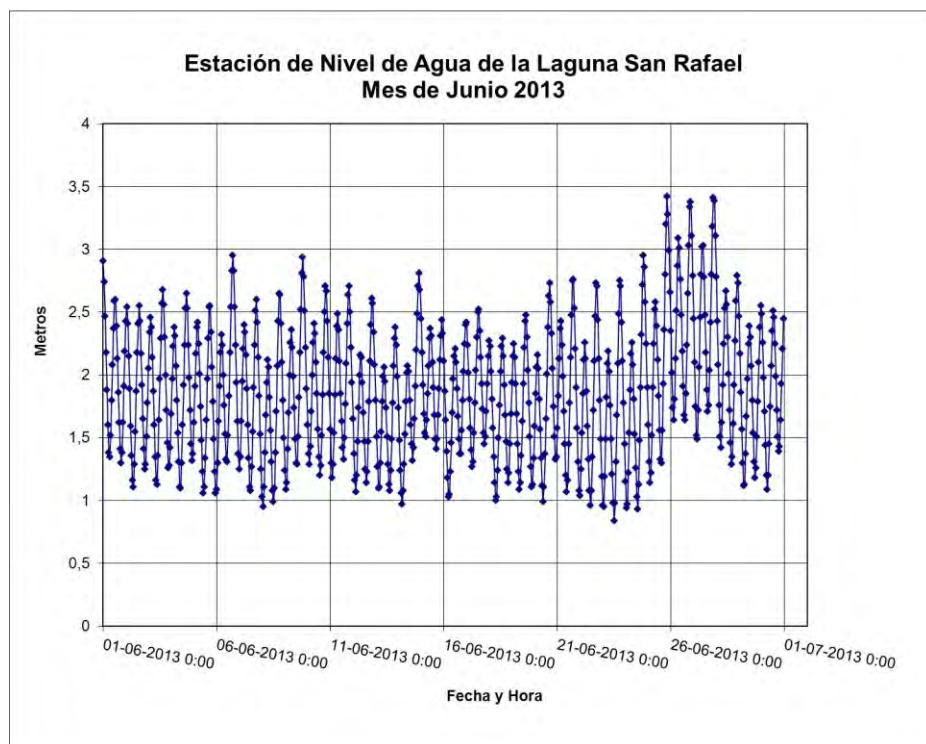


Figura 10.4-N. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de junio 2013.

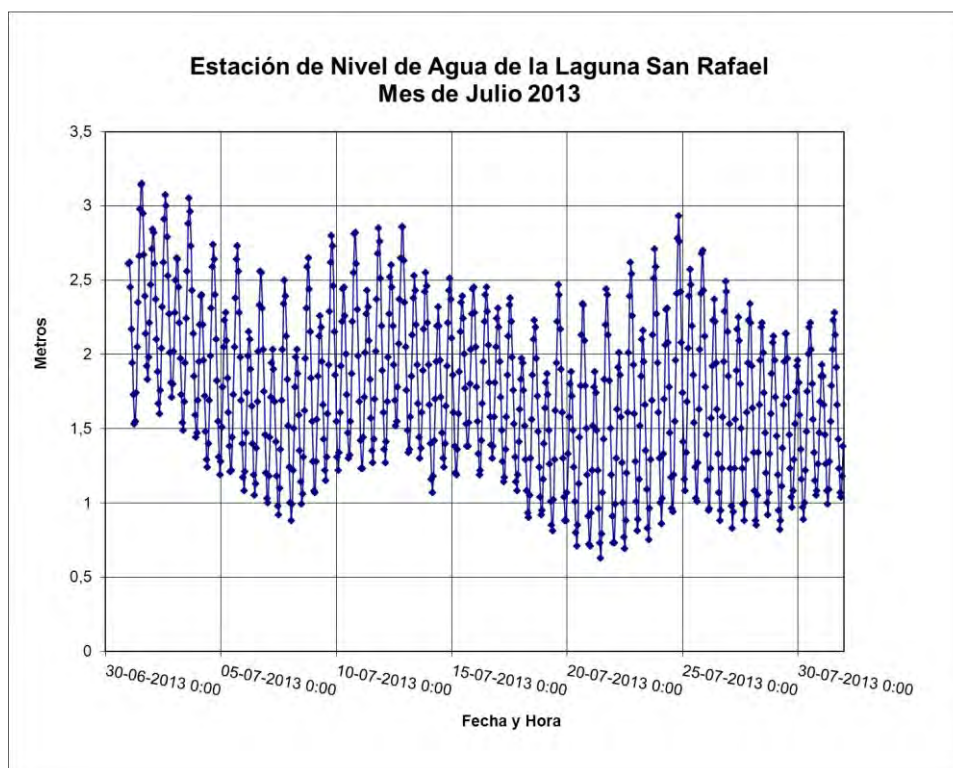


Figura 10.4-O. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de julio 2013.

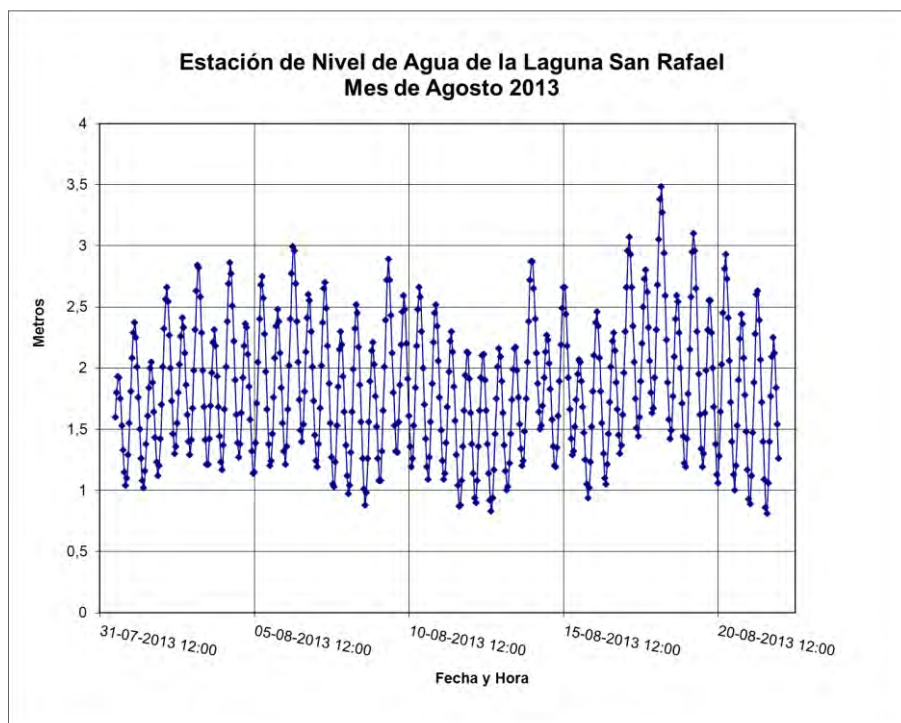


Figura 10.4-P. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de agosto 2013.

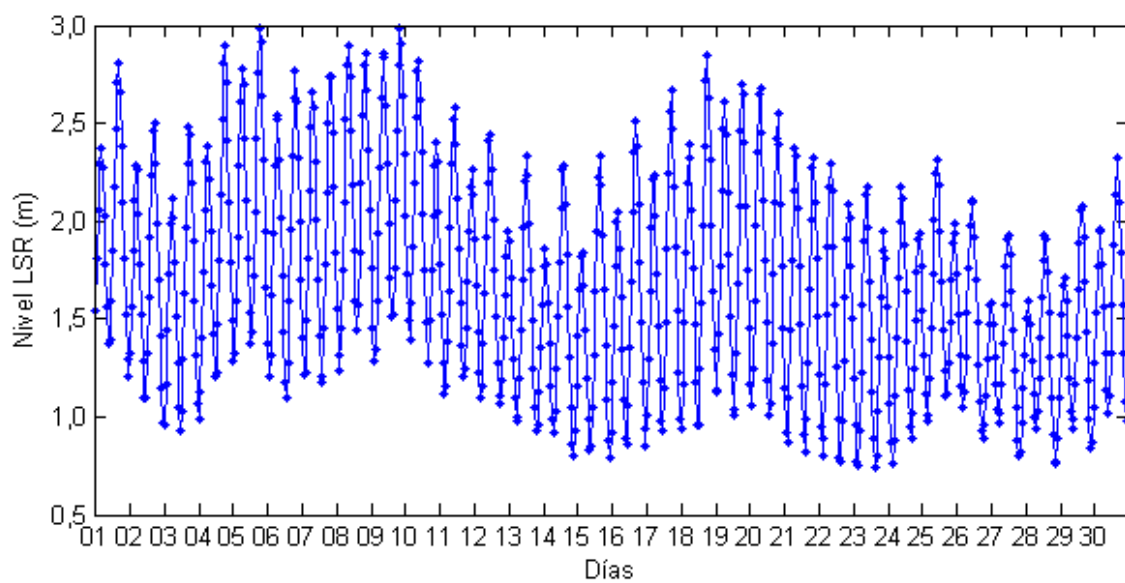


Figura 10.4-Q. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de septiembre 2013.

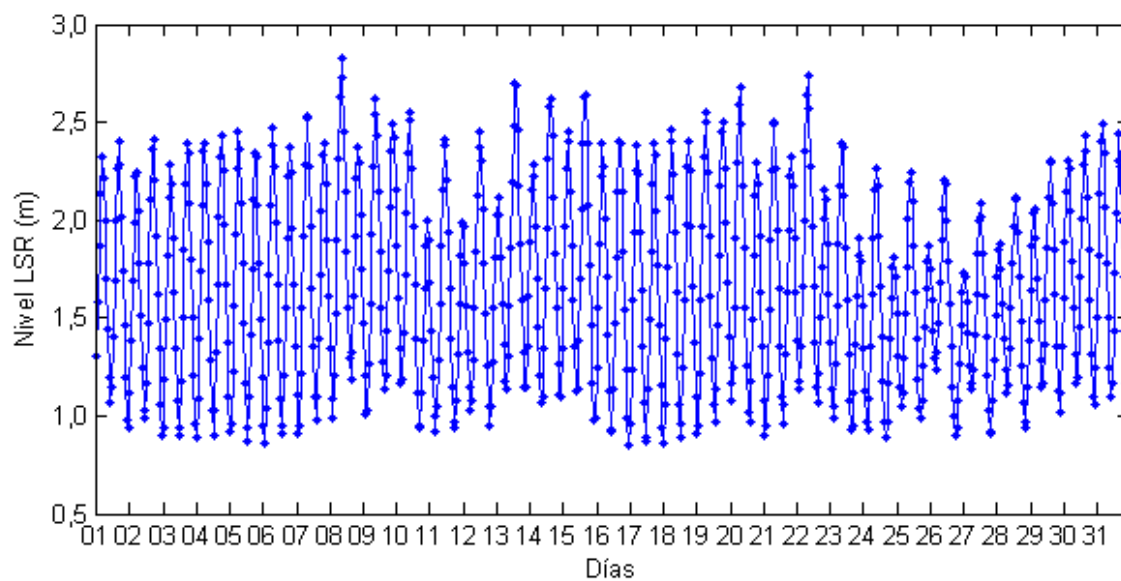


Figura 10.4-R. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de octubre 2013.

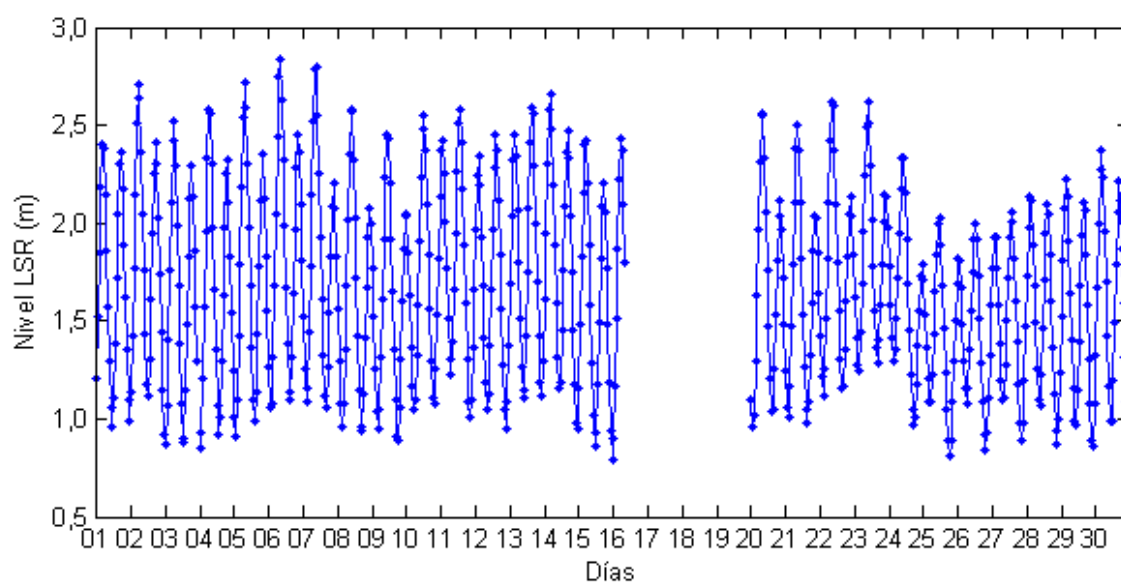


Figura 10.4-S. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de noviembre 2013.

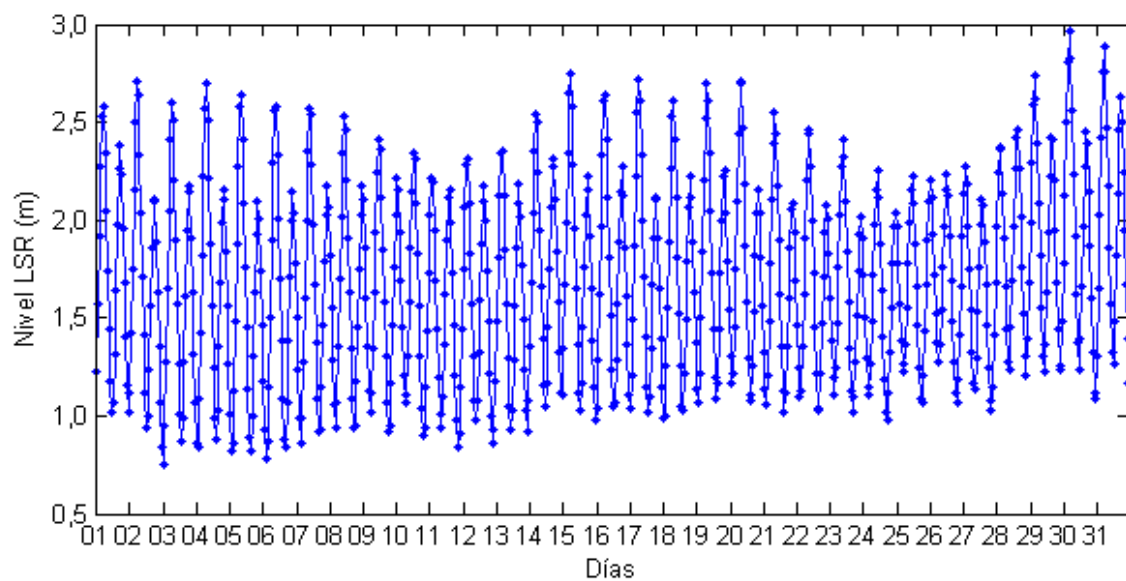


Figura 10.4-T. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de diciembre 2013.

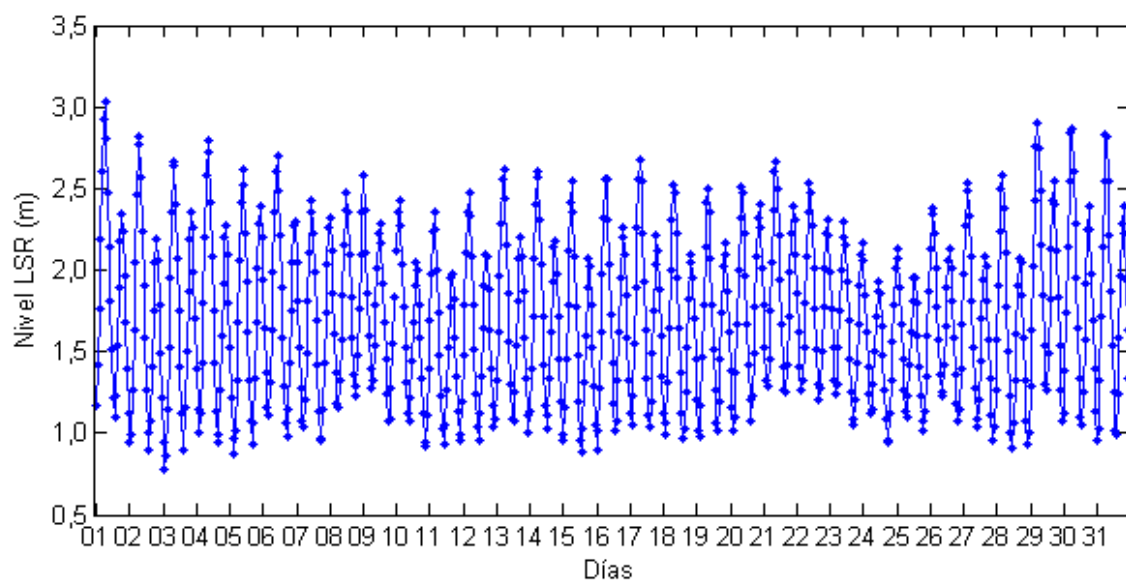


Figura 10.4-U. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de enero 2014.

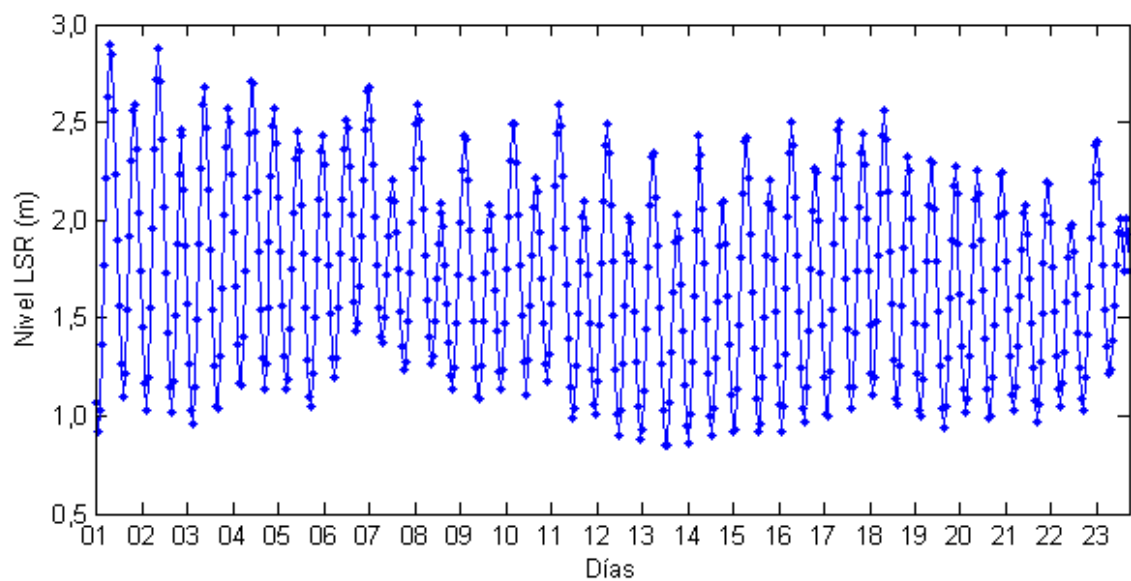


Figura 10.4-V. Nivel de agua de la antigua estación de LSR, mes de febrero 2014.

Tabla 10.4-A. Registros de valores máximos, mínimos y promedio del nivel de agua en la laguna San Rafael.

MES	PROMEDIO (m)	FECHA REGISTRO	MÁX. (m)	FECHA REGISTRO	MÍN. (m)
Mayo-2012	1,83	27-05-2012 22:00	2,97	23-05-2012 2:00	0,97
Junio-2012	1,79	30-06-2012 16:00	3,00	06-06-2012 14:00	0,72
Julio-2012	1,72	01-07-2012 16:00	2,98	10-07-2012 5:00	0,82
Agosto-2012	1,79	13-08-2012 16:00	3,24	04-08-2012 14:00	0,83
Septiembre-2012	1,68	14-09-2012 17:00	2,86	24-09-2012 21:00	0,70
Octubre-2012	1,68	03-10-2012 8:00	2,94	15-10-2012 0:00	0,78
Noviembre-2012	1,67	15-11-2012 7:00	2,76	16-11-2012 2:00	0,81
Diciembre-2012	1,88	14-12-2012 7:00	3,26	31-12-2012 15:00	0,93
Enero-2013	1,64	11-01-2013 6:00	2,91	13-01-2013 1:00	0,72
Febrero-2013	1,68	11-02-2013 7:00	3,05	25-02-2013 0:00	0,80
Marzo-2013	1,67	09-03-2013 4:00	2,82	13-03-2013 14:00	0,75
Abril-2013	1,79	28-04-2013 20:00	2,95	25-04-2013 12:00	0,85
Mayo-2013	1,84	27-05-2013 20:00	3,35	15-05-2013 4:00	0,84
Junio-2013	1,87	25-06-2013 20:00	3,42	23-06-2013 12:00	0,84
Julio-2013	1,75	01-07-2013 14:00	3,15	21-07-2013 11:00	0,63
Agosto-2013	1,84	18-08-2013 16:00	3,48	22-08-2013 2:00	0,81
Agosto-2013	1,79	18-08-2013 16:00	3,48	24-08-2013 03:00	0,74
Septiembre-2013	1,69	05-09-2013 18:00	2,99	23-09-2013 15:00	0,74
Octubre-2013	1,66	08-10-2013 8:00	2,83	16/10/2013 23:00	0,85
Noviembre-2013	1,67	06-11-2013 8:00	2,84	15/11/2013 23:00	0,79
Diciembre-2013	1,69	30-12-2013 04:00	2,97	03-12-2013 00:00	0,75
Enero-2014	1,71	01-01-2014 06:00	3,03	03-01-2014 01:00	0,78
Febrero-2014	1,71	01-02-2014 7:00	2,90	13-02-2014 12:00	0,85

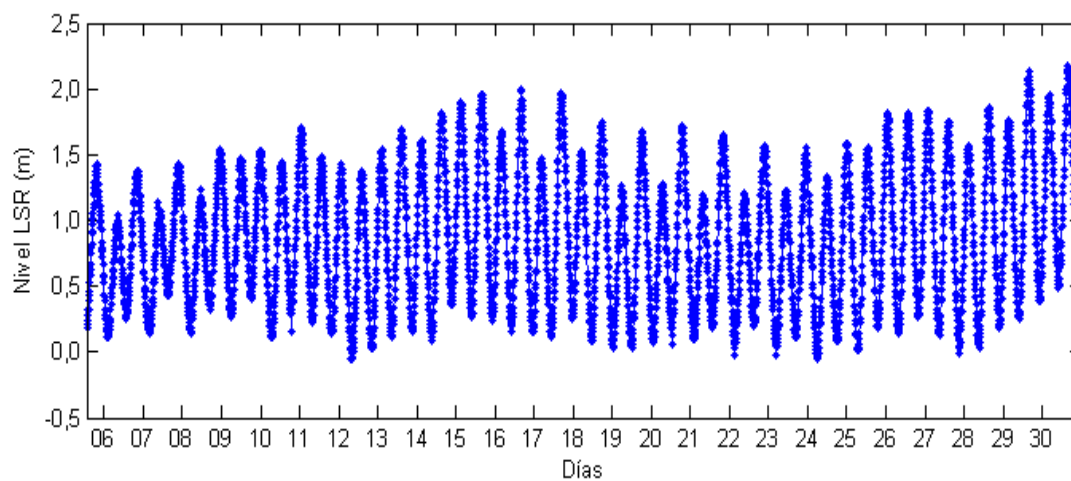


Figura 10.4-W. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de abril 2014.

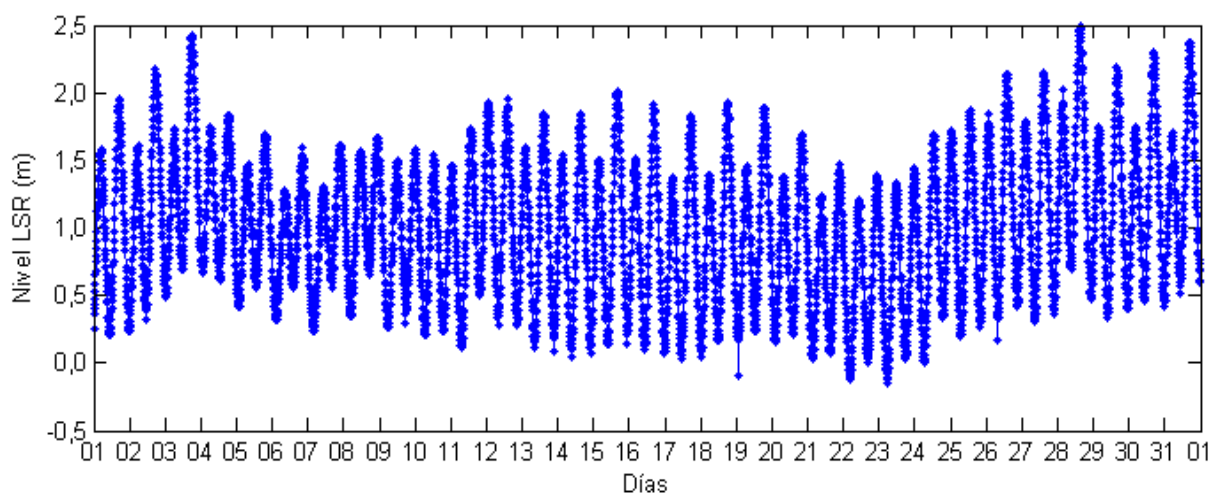


Figura 10.4-X. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de mayo 2014.

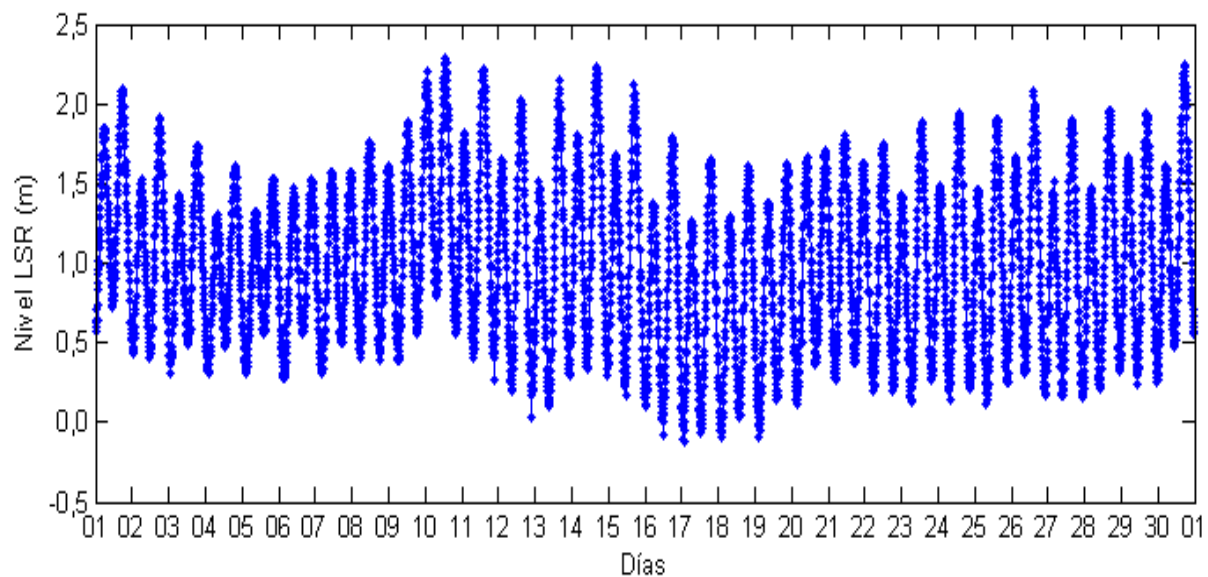


Figura 10.4-Y. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de junio 2014.

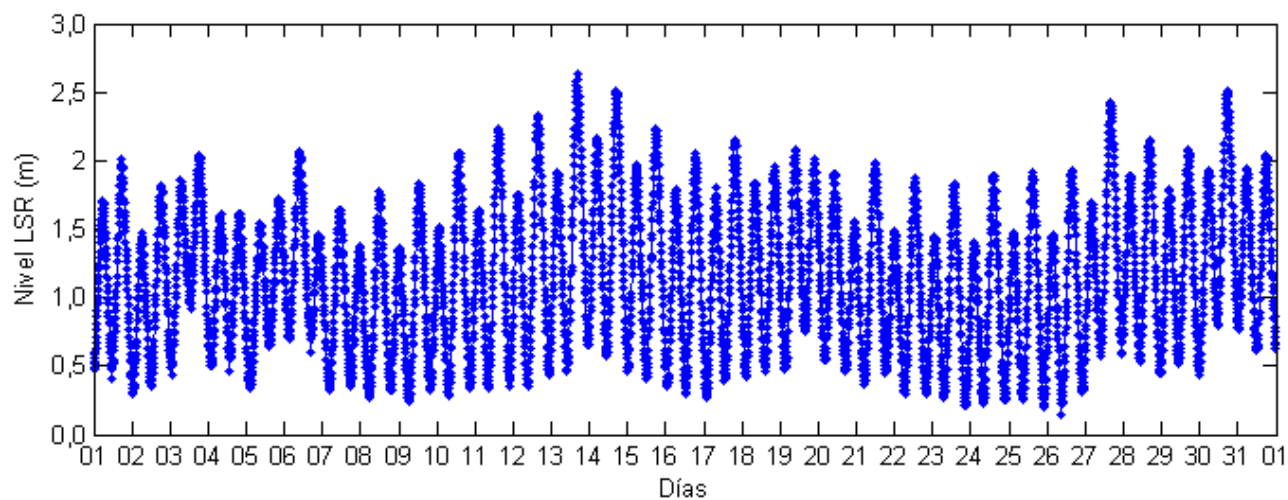


Figura 10.4-Z. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de julio 2014.

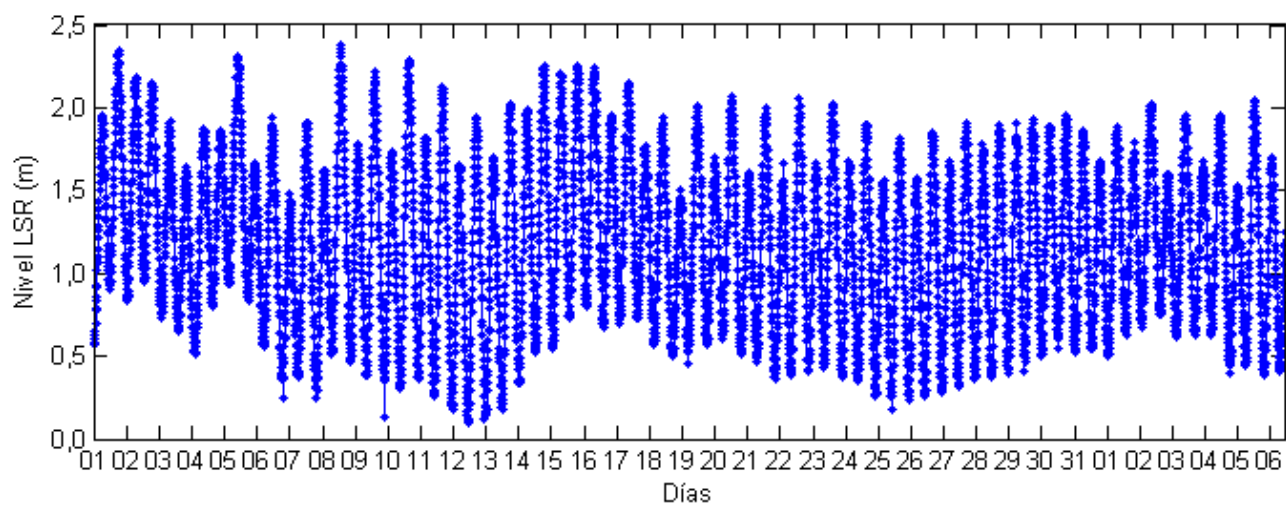


Figura 10.4-AA. Nivel de agua nueva estación de nivel LSR, mes de agosto y primeros días de septiembre 2014.

Tabla 10.4-B. Registros de valores máximos, mínimos y promedio del nivel de agua en la nueva estación de nivel de la laguna San Rafael, periodo 5 de abril a 6 de septiembre 2014.

MES	PROMEDIO (m)	FECHA REGISTRO	MÁX. (m)	FECHA REGISTRO	MÍN. (m)
5 -30 Abr. 2014	0,87	30/04/2014 16:00	2,17	24/04/2014 06:00	-0,06
May.-14	1,00	28/05/2014 15:10	2,49	23/05/2014 5:10	-0,14
Jun.-14	1,00	10/06/2014 13:10	2,29	17/06/2014 1:30	-0,12
Jul.-14	1,15	13/07/2014 16:20	2,63	26/07/2014 9:00	0,15
1 Ago. - 6 Sep. 2014	1,18	08/08/2014 12:50	2,38	12/08/2014 10:50	0,09

En los registros observados de nivel de agua en la Laguna San Rafael, en la antigua y nueva estación, se aprecian cambios periódicos de nivel de agua principalmente influenciado por las mareas. Dos veces al día el nivel del mar sube y baja alternativamente, aproximadamente cada 6 horas. La amplitud de las mareas semidiurnas (Fierro *et al.*, 2003), varía a lo largo del mes, coincidiendo las máximas, de hasta 2,5 m de amplitud en el periodo, con las lunas nueva y llena. La diferencia entre las marea alta y baja varía considerablemente en general según sea la forma de la cuenca oceánica, los contornos costeros, la presión atmosférica y los vientos predominantes. En los registros de nivel de agua de la laguna San Rafael se aprecia la influencia del tipo de marea semidiurnas desiguales, con ciclos por día lunar con marcadas diferencias en las alturas máximas en las pleamares, y en las bajamares no se aprecian desniveles acentuados, por ello las cuencas interiores tienen su propio modo natural de oscilación que depende principalmente de sus dimensiones. Las diferencias en las amplitudes diurnas podrían reflejar diferencias de aporte hídrico a la laguna debido a variaciones en la tasa de fusión en la superficie de los glaciares y manto de nieve del entorno.

Para determinar la influencia del cambio de desnivel de agua por el efecto de desprendimiento de bloques de hielo se sugiere la instalación de un mareógrafo localizado en el extremo sur del fiordo Elefantes, donde desagua el río Témpanos que nace en la laguna San Rafael.

11. MODELACIÓN DE LA ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN

11.1. METODOLOGÍA

Para la modelación de la acumulación y ablación se utiliza un modelo simple tipo PDD (Positive Degree-Day) basado en el modelo de Rasmussen (2009). El modelo se calibra para determinar el balance de masa en el glaciar a partir de datos de precipitación diaria en estaciones cercanas al glaciar y temperatura promedio diaria en el glaciar.

Para determinar el balance en Campo de Hielo Patagónico Norte se utilizan los datos medidos en la Torre 1 (periodo 3 septiembre 2013 al 22 agosto 2014), los datos estimados en la Torre 2 (que corresponden a la extrapolación de los datos de la Torre 1 puesto que lamentablemente falló el datalogger en la Torre 2) y los datos medidos en las estaciones más cercanas con datos de precipitación y temperatura que corresponden a la estación en laguna San Rafael (LSR), la estación Río Nef antes junta estero El Rebalse (LN) y río Colonia en nacimiento (RC), ver Fig. 11.1-A.

Se determinaron para el modelo 4 conjuntos diferentes de parámetros asociados a cada una de las 4 zonas siguientes de CHPN, según su exposición oceánica (gradiente este-oeste) y el gradiente latitudinal (norte-sur):

- 1) Noreste: zona comprendida entre Torre 1 y estación LSR
- 2) Sureste: zona comprendida entre Torre 2 y estación LSR
- 3) Noroeste: zona comprendida entre Torre 2 y estación Río Nef antes junta estero El Rebalse
- 4) Suroeste: zona comprendida entre Torre 2 y estación Río Colonia en Nacimiento.

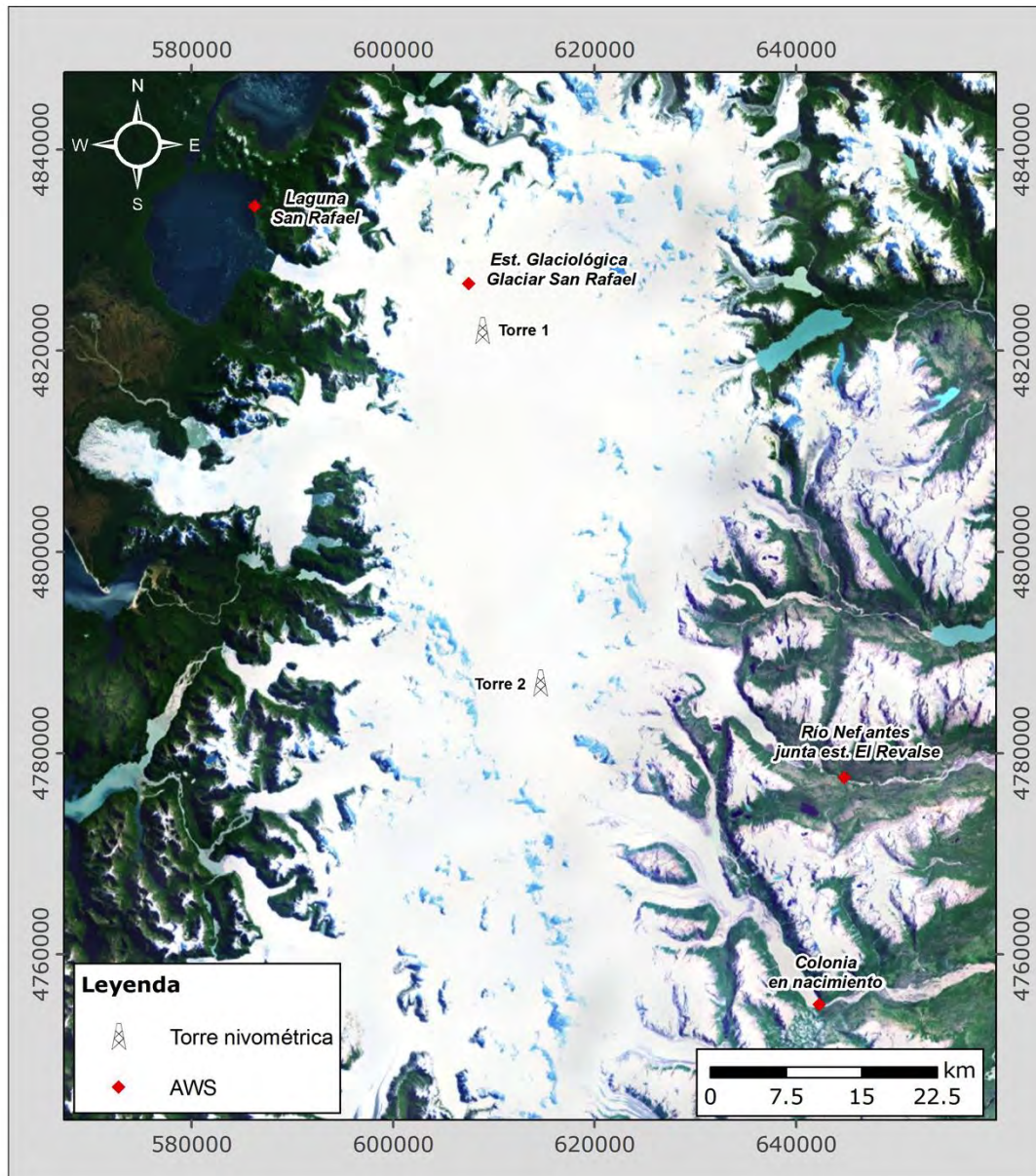


Figura 11.1-A. Estaciones meteorológicas (AWS) utilizadas en el modelo de acumulación y ablación.

El modelo simple de Rasmussen (2009) consiste en usar las sumatorias de datos diarios de temperatura y precipitación para generar balances promedio, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$B_n^* = \alpha \sum P + \beta \sum T^+ + \gamma$$

α , β , γ son parámetros del modelo que se deben determinar mediante una regresión lineal con los datos de ablación y acumulación, P es la precipitación diaria y T^+ se calcula con la siguiente fórmula:

$$T^+ = \frac{1}{2}(T + |T|)$$

donde T es la temperatura promedio diaria.

Los datos de entrada al modelo son las precipitaciones diarias rellenadas y extrapoladas a la ubicación de las torres y las temperaturas del aire promedio diarias en la Torre 1.

La precipitación puede presentarse en forma sólida o líquida. Según Rasmussen (2009), para el modelo de acumulación se considera solo la precipitación sólida como aporte a la acumulación, suponiendo que la precipitación líquida escurre aguas abajo del glaciar. Esta hipótesis no es necesariamente cierta en CHPN ya que en muchas áreas debido a la baja pendiente y gran extensión del campo de hielo, la precipitación líquida puede incorporarse a la napa freática al llegar a la interfaz neviza-hielo y permanecer en el glaciar un tiempo largo. Sin embargo considerando que este es un modelo simple y que no se cuentan con datos apropiados para determinar la influencia de la precipitación líquida se utiliza la hipótesis de Rasmussen (2009).

Para diferenciar entre precipitación sólida y líquida se asume que la precipitación es líquida cuando la temperatura es mayor a 0°C , y en caso contrario es sólida.

Para la calibración de los 4 modelos y estimación de los coeficientes α , β , γ se utilizan las alturas de nieve medidas en la Torre 1 y aquellas estimadas en la Torre 2, que corresponden a un balance continuo en el tiempo. Se realiza una regresión lineal múltiple y además se impone que el balance sea igual a cero en la altura de la línea de equilibrio, obteniendo a través de esta condición la temperatura en la línea de equilibrio.

El periodo de calibración de los modelos corresponde al periodo en que se cuenta con datos de registrados en la Torre 1, desde su instalación el 3 de septiembre 2013 hasta su retiro el 22 de agosto 2014.

11.2. RESULTADOS

11.2.1. Torre nivométrica glaciar San Rafael

Los datos de temperatura en la torre nivométrica San Rafael corresponde a cuatro sensores de temperatura instalados inicialmente a 4 m sobre la superficie (T1), 1,5 m sobre la superficie (T2), 2 m bajo la superficie (T3), y 4 m bajo la superficie (T4). En la Fig. 11.2.1-A se presentan los datos de temperatura registrados. Se observa que inicialmente los datos de temperatura del aire (T1 y T2) varían de forma muy similar entre valores negativos y positivos, mientras que las temperaturas de la nieve (T3 y T4) se mantienen en 0°C la mayor parte del tiempo. A partir del 13 de diciembre del 2013 esta situación cambia y la temperatura en T3 comienza a ser positiva y presenta variaciones diarias. Como en esta fecha T3 aún se encuentra bajo 2 m de nieve su aumento de temperatura se debe probablemente al agua de fusión de la nieve. El 16 de enero 2014 la temperatura en T4 comienza a subir de cero grado algunos días, en esta fecha T4 se encuentra a 3 metros de profundidad y su aumento de temperatura también se debe probablemente al agua de fusión.

En la Fig. 11.2.1-B se presenta la altura de nieve medida en la Torre 1. Se observa un aumento de la altura de nieve (ablación) entre el inicio del registro y los primeros días de abril, a partir de cuando comienza a disminuir la altura producto que comienza el periodo de acumulación, con una acumulación de aproximadamente 4 m entre los primeros días de abril de 2014 y el 22 de agosto de 2014, fecha del retiro de los sensores.

La Torre 1 se encontró sobresaliendo una altura de 3,2 m sobre la superficie el 22 de agosto de 2014, por lo cual la acumulación neta anual fue de 1,8 m puesto que se había dejado hacía 1 año (29 agosto 2013) sobresaliendo 5 m. La posición de la Torre 1 en agosto 2014 era E 609.295, N 4.821.881, UTM 18S, WGS84 (coordenadas obtenidas mediante un GPS navegador), unos 440 m hacia el oeste de su ubicación original de agosto 2013. Para los cálculos posteriores se toma en cuenta la acumulación neta anual medida por el sensor de altura de nieve, que fue de 1,93 m, un 7% más que la altura medida sobre la torre. Se considera más representativo el valor de 1,93 m puesto que la diferencia de altura de 1,8 m posiblemente esté influenciada por la alteración superficial provocada por la excavación de nieve al enterrar la torre.

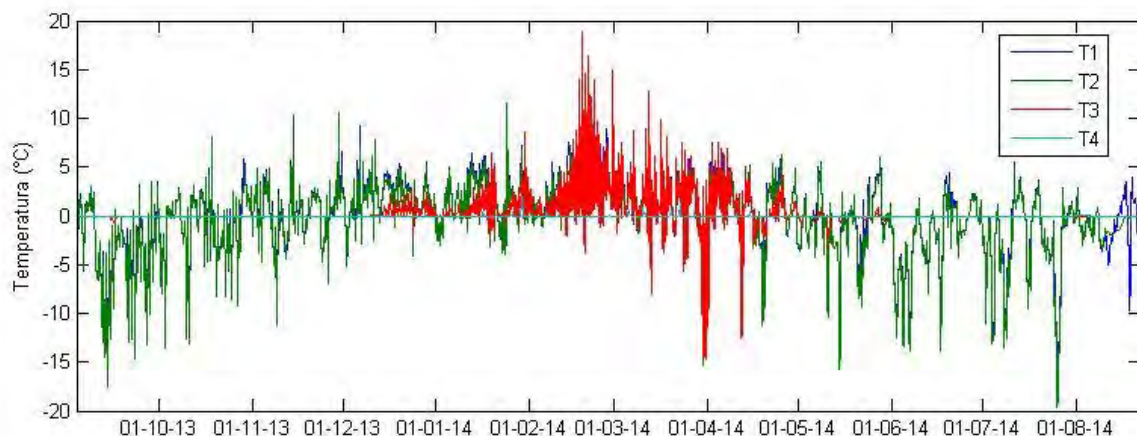


Figura 11.2.1-A. Temperaturas del aire y nieve registradas en la Torre 1.

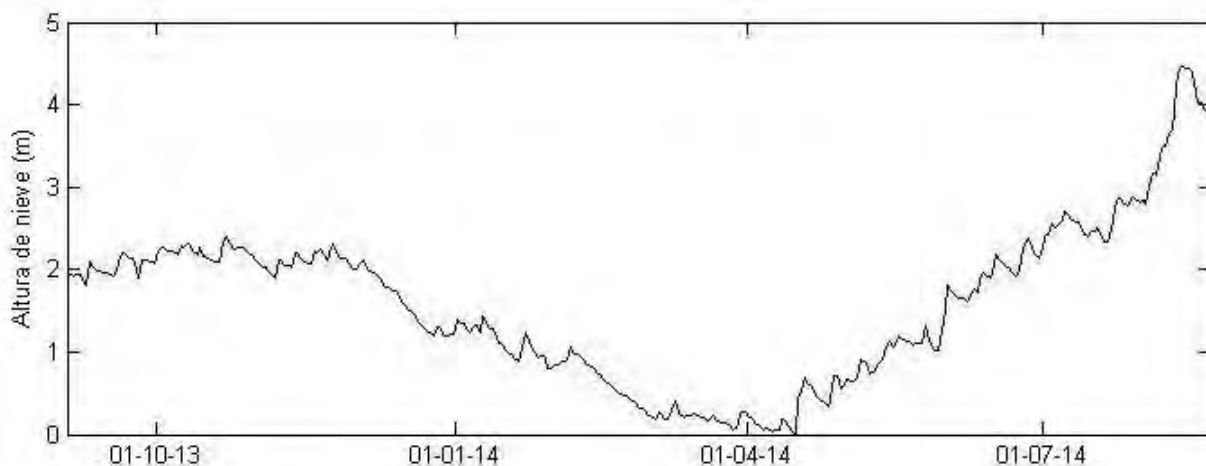


Figura 11.2.1-B. Altura de nieve registrada en la Torre 1 (San Rafael). La altura inicial de 1,9 m es un valor arbitrario de ajuste para representar todos los valores de altura de nieve en valores positivos, con un valor cero al final de la temporada de ablación.

Los datos de temperatura utilizados en la calibración del modelo corresponden al sensor T1 (inicialmente a 4,4 m de la superficie y finalmente a 2,3 m de la superficie al final del periodo) medidos en la Torre 1.

11.2.2. Torre nivométrica glaciar Colonia

La torre nivométrica glaciar Colonia se encontró sobresaliendo 52 cm sobre la superficie el 24 de agosto de 2014, en UTM E 614.638, UTM N 4.787.018, 18S, WGS84 (coordenadas obtenidas mediante un GPS navegador), unos 30 m al sur de su posición original en agosto de 2013, con una acumulación neta anual de nieve de 7,48 m puesto que se había dejado sobresaliendo 8 m.

En la Fig. 11.2.2-A se presenta la altura de nieve estimada en la torre nivométrica del glaciar Colonia a partir de los datos medidos en la torre San Rafael. Para estimar los datos de la torre Colonia, se considera que la ablación en la torre Colonia debiera ser del orden de 0.5 de la ablación en la torre San Rafael y que la acumulación en la torre Colonia debiera ser del orden de 2 veces la acumulación en la torre San Rafael. Además de obtener una acumulación total en la torre Colonia igual a la acumulación total medida de 7,48 m. Siguiendo estas hipótesis se obtuvo que multiplicando en el periodo de ablación (hasta el 16 de abril) los datos de la torre San Rafael por un coeficiente de 0.5 y en el periodo de acumulación (después del 16 de abril) por un coeficiente de 2.186 se obtiene un balance total igual al medido en la torre Colonia.

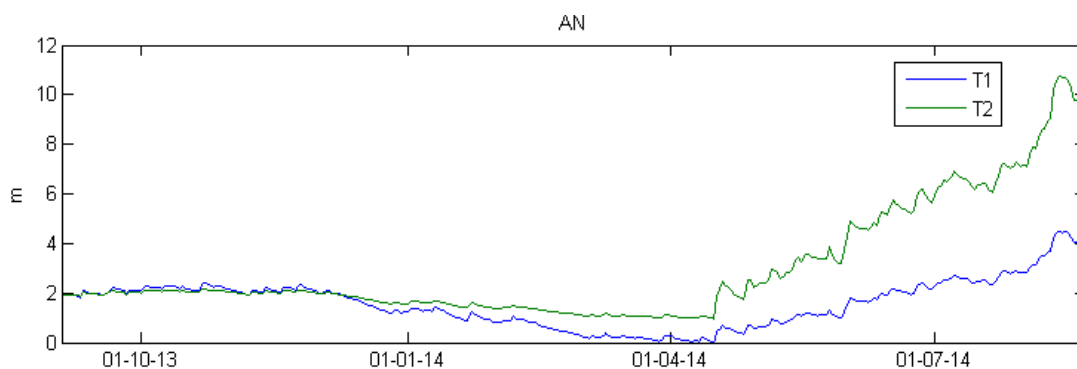


Figura 11.2.2-A. Altura de nieve horaria estimada para la Torre Colonia y medida en la Torre San Rafael.

11.2.3. Datos de precipitación

Los datos de precipitaciones registrados en la estación LSR, con un porcentaje de datos de solo un 56% en el periodo de calibración, se rellenaron utilizando los datos de la

estación Río Aysén en Puerto Aysén ubicada 130 km al norte de la estación LSR. El relleno de los datos se realizó con el gradiente de precipitación (1,72) estimado entre la precipitación acumulada en ambas estaciones en el periodo en que coinciden los registros, entre 1 de enero del 2012 al 31 de agosto del 2014. En este periodo se cuenta con 16.039 datos horarios, donde se descartaron los datos de la estación LSR a partir del 22 de enero del 2014, debido a datos erróneos. Después del relleno de datos de precipitación en LSR, el registro se completó en un 97%. En las Figs. 11.2.3-A y B se presentan los datos medidos y rellenos horarios y diarios. Ver también 4. Balance de Energía y Meteorología.

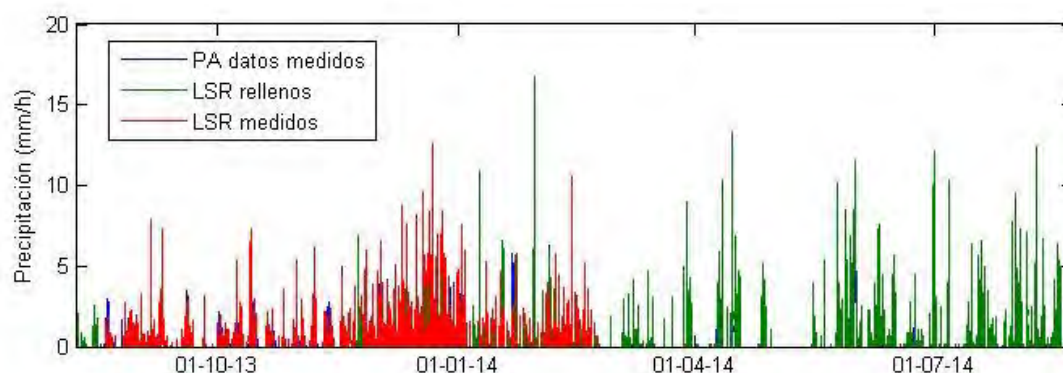


Figura 11.2.3-A. Datos de precipitación horaria medidos y rellenos en las estaciones laguna San Rafael (LSR) y Puerto Aysén (PA).

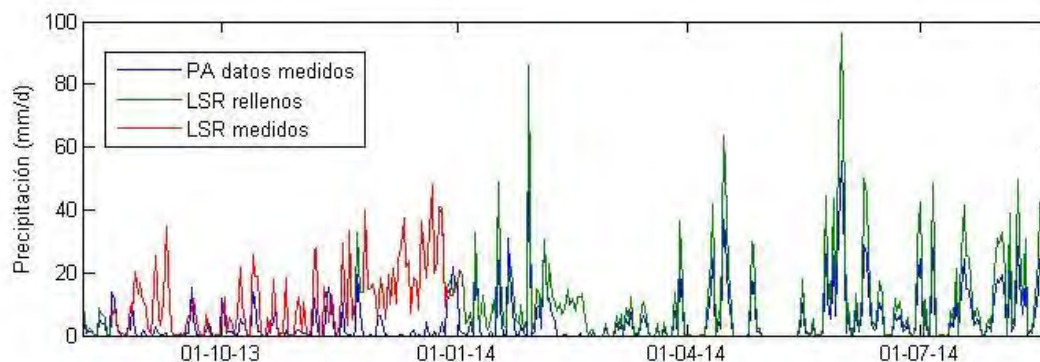


Figura 11.2.3-B. Datos de precipitación diaria medidos y rellenos en las estaciones laguna San Rafael (LSR) y Puerto Aysén (PA).

Los datos de precipitación en la estación Río Colonia en Nacimiento (CO) cuentan con un total de 292 del total de 380 datos durante el periodo de calibración. Para rellenar los datos se utiliza la estación Baker en Angostura Chacabuco (BC), con la que se obtiene un muy buen coeficiente de correlación R^2 de 0,83 entre las precipitaciones diarias con un total de 3.315 datos comunes. El relleno se realiza con una gradiente de precipitaciones diarias entre las estaciones.

Luego del relleno, los datos de la estación Río Colonia en Nacimiento tiene un total de 379 datos de 380. En la Fig. 11.2.3-C se presentan los datos originales y rellenos de la estación Río Colonia en Nacimiento.

Se decidió realizar el relleno con los datos diarios ya que se obtuvo una muy buena correlación y los resultados del relleno con datos acumulados no resultó igual de satisfactorio, mostrando máximos en los datos rellenos muy por encima de los datos observados.

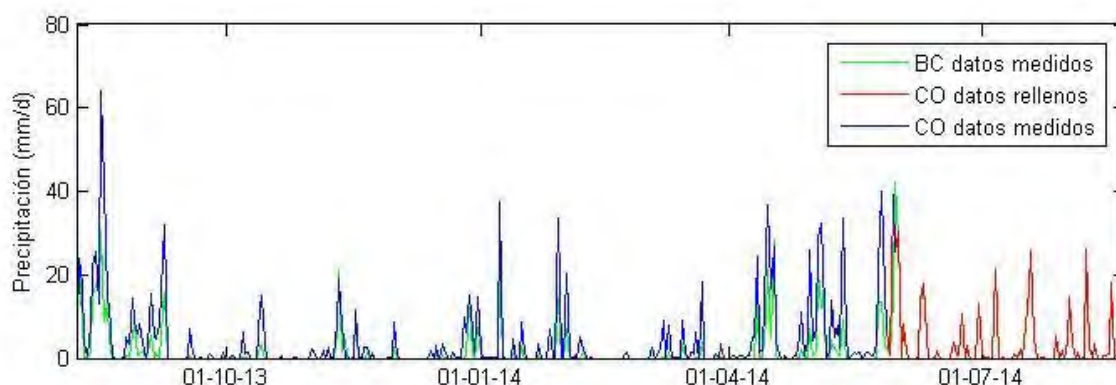


Figura 11.2.3-C. Datos de precipitación diaria medidos y rellenos en las estaciones Río Colonia en Nacimiento (RC) y Baker en Angostura Chacabuco (BC).

Los datos de precipitación en la estación Río Nef antes Junta Estero Rebalse (RN) cuentan con un total de 324 del total de 380 datos durante el periodo de calibración. Para rellenar los datos se utiliza la estación Caleta Tortel (CT), con la que se obtiene un coeficiente de correlación R^2 de 0,66 entre las precipitaciones diarias con un total de

3.600 datos diarios comunes, y en segunda opción la estación Río Cochrane en Cochrane (RC) con la que se obtiene un coeficiente de correlación R^2 de 0,64 entre las precipitaciones diarias, con un total de 3.259 datos diarios comunes. El relleno se realiza con una gradiente de precipitaciones diarias entre las estaciones. Se decidió realizar el relleno con los datos diarios ya que los resultados del relleno con datos acumulados no resulto satisfactorio, mostrando máximos en los datos rellenos muy por encima de los datos observados. Sin embargo se debe tener en cuenta que los coeficientes de correlación entre la estación RN-CT y RN-CC no son ideales ya que se encuentran bajo 0,8, por lo cual los datos rellenos deben utilizarse con precaución.

Luego del relleno con la estación CT, los datos de la estación RN tiene un total de 356 de 380 y luego del relleno con la estación CC se obtiene un total 380. En la Fig. 11.2.3-D se presentan los datos originales y rellenos de la estación río Colonia en Nacimiento.

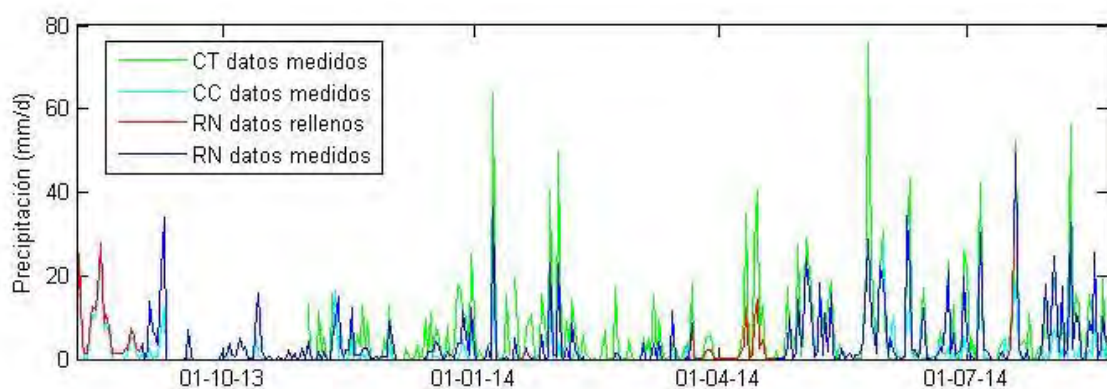


Figura 11.2.3-D datos de precipitación diaria medidos y rellenos en las estaciones Río Nef antes Junta Estero Rebalse (RN), Puerto Chacabuco (CT) y Cochrane en Cochrane (CC).

11.2.4. Calibración del modelo

11.2.4.1. *Calculo de la precipitación sobre CHPN*

La precipitación en las torres, que corresponde a los datos P del modelo, se estima a partir de las precipitaciones rellenas en las estaciones cercanas al CHPN y un gradiente

de precipitación. Para los modelos Noreste y Noroeste se utilizó el gradiente estimado por Fujiyoshi *et al.* (1987), quien realizó mediciones de las precipitaciones en el glaciar San Rafael a distintas altitudes entre octubre de 1985 y febrero de 1986. Se obtiene a partir de los datos de Fujiyoshi *et al.* (1987) que la precipitación en la torre San Rafael (altitud 1152 m s.n.m.) es 2,5 veces la precipitación en LSR (altitud 0 m s.n.m.), vale decir el gradiente altitudinal es de 0.0017 mm/m. Para la estimación de la precipitación en la torre Colonia se utiliza el mismo gradiente calculado entre LSR y torre San Rafael.

11.2.4.2. **Balance de masa medido**

Para la calibración del modelo las alturas de nieve son convertidas a m de equivalente en agua, utilizando las densidades promedio de la capa de acumulación del periodo, según las medidas tomadas en terreno en los pozos estratigráficos realizados en las dos torres. Las densidades promedio son 0,41 gr/cm³ para los 1,93 m de balance anual en la torre San Rafael y 0,48 gr/cm³ para los 7,48 m de balance anual en la torre Colonia.

11.2.4.3. **Resultados del modelo**

Al calibrar los 4 modelos se obtienen los parámetros presentados en la tabla 11.2.4.3-A, donde se observa que los modelos representan de forma aceptable el comportamiento de los datos ya que los coeficientes de correlación R^2 son cercanos a 1 y más altos que los valores entre 0,83 y 0,60 encontrados por Rasmussen (2009).

En la Tabla 11.2.4.3-B se presentan los balances de todo el periodo, observados y simulados con los modelo. Se observa que existen diferencias de entre un -0,4% y un 5,3%. Las diferencias se deben a que utilizando únicamente las variables de precipitación y temperatura el modelo no es capaz de representar completamente todos los procesos involucrados en el balance de masa superficial.

En la Fig. 11.2.4.3-A se presentan los valores diarios de los balances observados, y estimados en las torres además de los balances estimados en las líneas de equilibrio. Se observa la aceptable representación del comportamiento del balance de masa superficial en todos los modelos.

Sin embargo como se observa en la Tabla 11.2.4.3-B el mejor ajuste al balance total del

periodo es del modelo NO, seguido por los modelos SO y SE. El modelo NE es el que tiene una mayor diferencia de un 5.4% respecto al balance total medido, ya que no es capaz de representar completamente el último aumento de la acumulación.

Tabla 11.2.4.3-A. Parámetros de calibración de los modelos.

	Noroeste	Suroeste	Noreste	Suroeste
Alfa	0.5200	1.15	1.1800	2.9700
Beta	-0.0051	-0.0066	-0.0034	-0.0041
Gamma	0.5758	-0.6977	0.6856	-0.3089
R²	0.79	0.79	0.88	0.93

Tabla 11.2.4.3-B Balances totales observados y estimados con los modelos.

	Noroeste		Suroeste		Noreste		Sureste	
	T1	ELA	T2	ELA	T1	ELA	T2	ELA
Balance observado* (m eq.a.)	0,789	0.000	3.592	0.000	0.789	0.000	3.59	0.000
Balance estimado (m eq.a.)	0.786	0.003	3.538	0.002	0.831	0.011	3.706	0.002
Diferencia (%)	-0.4	-	1.5	-	5.3	-	3.17	-

*Los balances observados en el SE y SO son estimaciones a partir de los datos en la Torre 1.

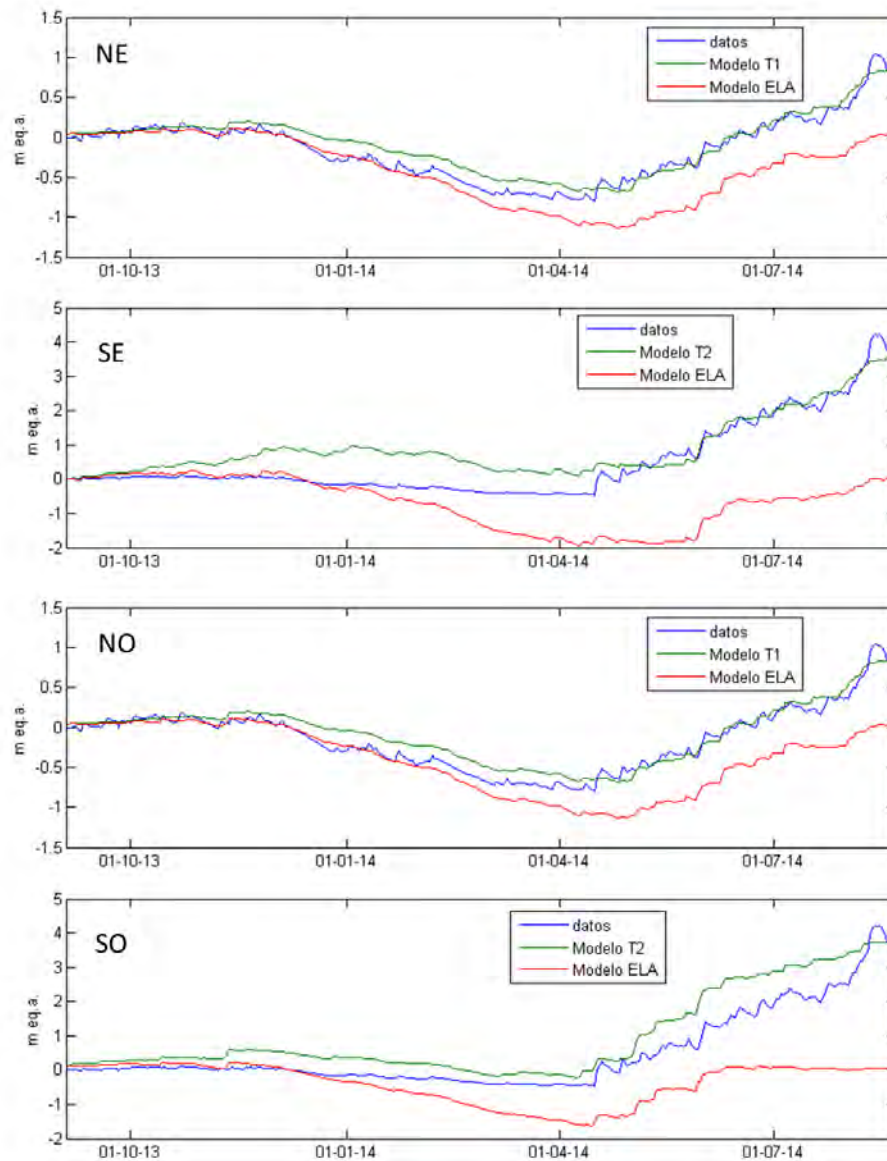


Figura 11.2.4.3-A. Balances diarios observados y estimados con los modelos.

11.2.4.4. ***Extrapolación de los modelos a toda el área***

Para extrapolar los modelos a toda el área del CHN se calcula la temperatura a las distintas altitudes utilizando el gradiente de temperatura promedio en la atmosfera igual a $0,0065\text{ }^{\circ}\text{C/m}$. Se utiliza la topografía del modelo digital de terreno (DEM) SRTM, discretizada en una grilla de $60\text{ m} \times 60\text{ m}$. En la Fig. 11.2.4.4-A se presenta la grilla topográfica utilizada.

Para dividir el área en las zonas representativas de cada modelo, se tomó como límite E-O las alturas máximas, ya que éste es un límite geomorfológico que caracteriza las precipitaciones. Se consideró como límite N-S la coordenada UTM N 4.790.000 donde comienza aproximadamente el glaciar Colonia. En la Fig. 11.2.4.4-B se presentan las cuatro zonas.

En la Fig. 11.2.4.4-C se presentan las precipitaciones acumuladas extrapoladas a cada celda de la grilla con el gradiente de precipitación. Se observa que las precipitaciones anuales máximas son de 16,4 m eq.a. en la zona más alta y disminuyen hacia las zonas más bajas y hacia el norte.

En la Fig. 11.2.4.4-D se presenta el balance de masa superficial anual calculado con el modelo en cada una de las celdas de la grilla. Se observa que los mayores balances se presentan en las zonas más altas y disminuyen hacia las zonas bajas. El balance máximo es de 18,9 m eq.a. y el mínimo es de -27,7 m eq.a.

Si comparamos los resultados con otros modelo como el de Shaefer *et al.* (2013), se observa que los resultados obtenidos en el presente estudio están en un rango de valores similar, sin embargo existe menor acumulación y mayor ablación, por lo que el balance total resulta mayor.

Finalmente el balance promedio es 2,0 m eq.a., en un área igual a 3.951,5 km² y el balance total en volumen estimado en todo el glaciar $7,9 \times 10^9$ m³ eq.a.

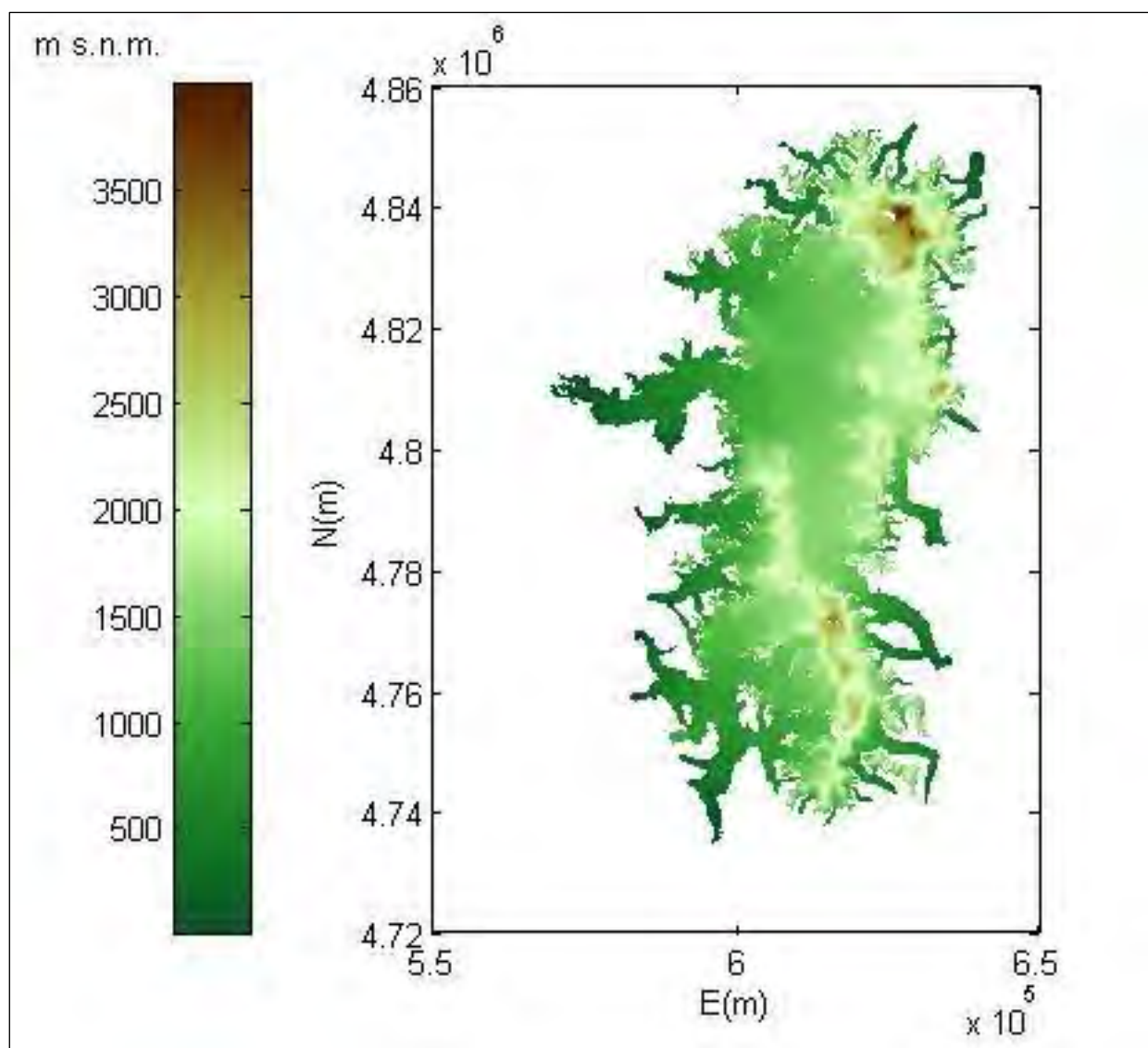


Figura 11.2.4.4-A. Grilla topográfica SRTM utilizada para la extrapolación del modelo de acumulación-ablación.

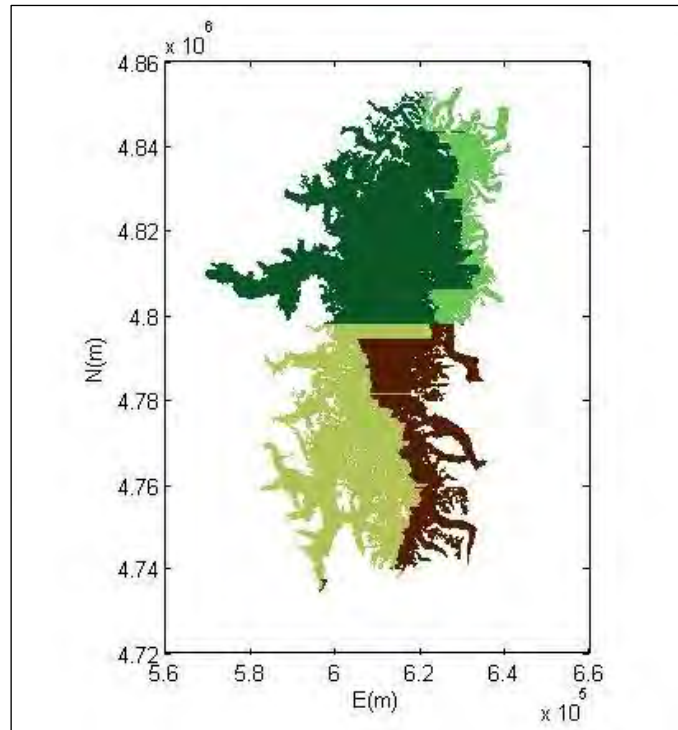


Figura 11.2.4.4-B. Zonas representativas de cada modelo: NO, NE, SO, SE.

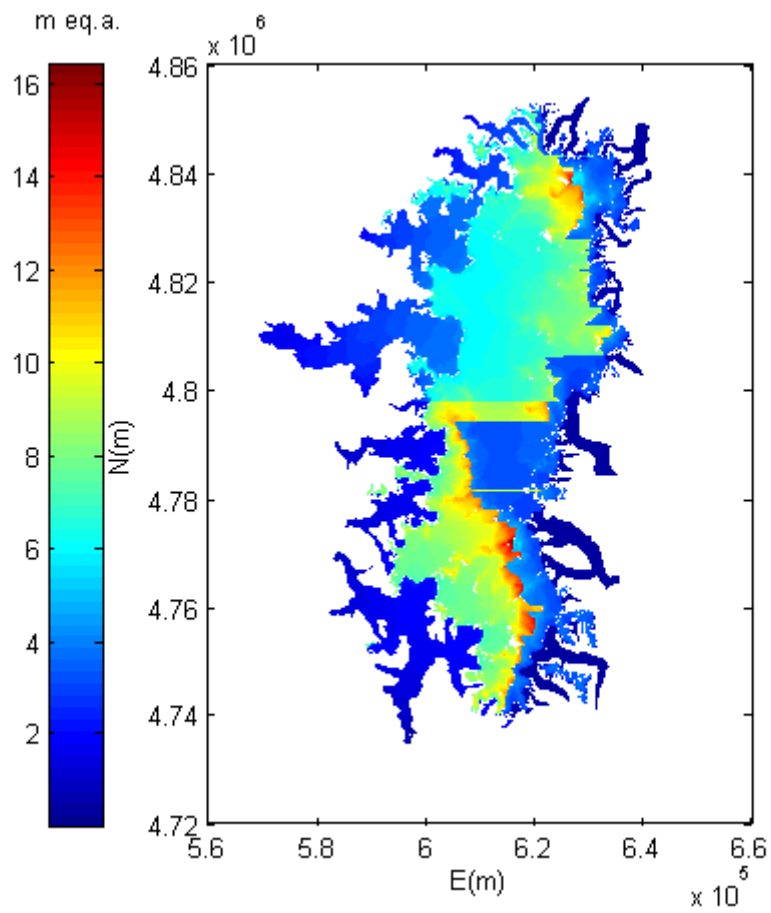


Figura 11.2.4.4-C. Precipitación acumulada en m eq.a.

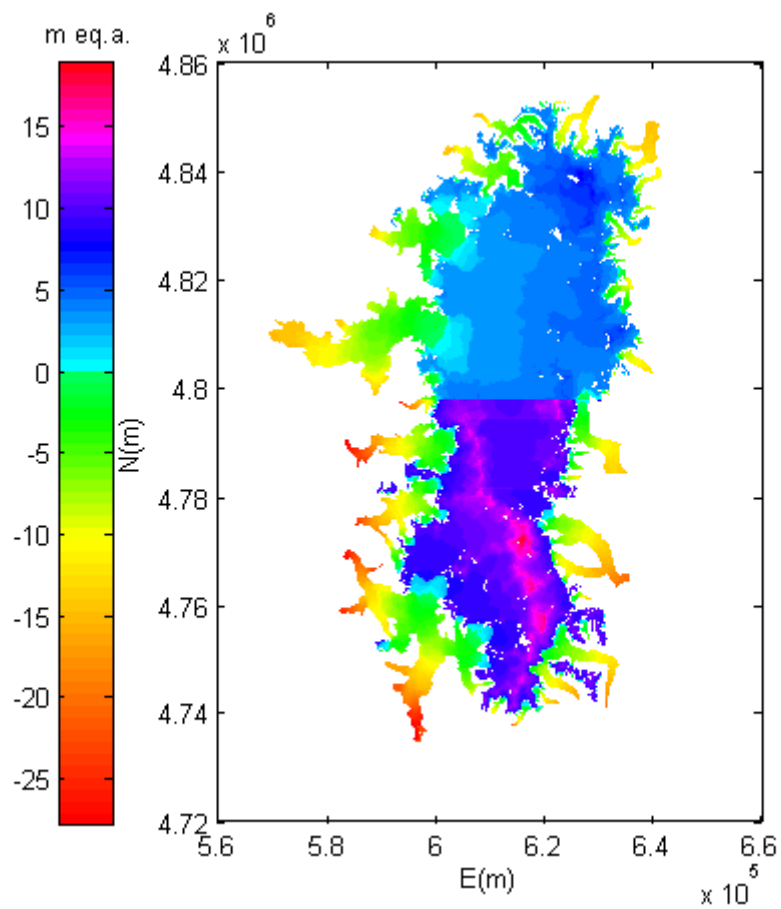


Figura 11.2.4.4-D. Balance superficial estimado con el modelo.

12. CAMBIOS DE ELEVACIÓN MEDIANTE DATOS GPS

12.1. METODOLOGÍA

Se determinan en esta sección los cambios de elevación en la zona de acumulación de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia, mediante la comparación de datos GPS diferencial (DGPS) en los periodos 2010-2014, 2011-2014, 2010-2011 y 2013-2014. Éstos fueron determinados según la disponibilidad de datos para cada uno de los glaciares. La Tabla 12.1-A muestra las fechas de los datos DGPS disponibles, la fuente de los datos y el número respectivo de puntos de cada levantamiento.

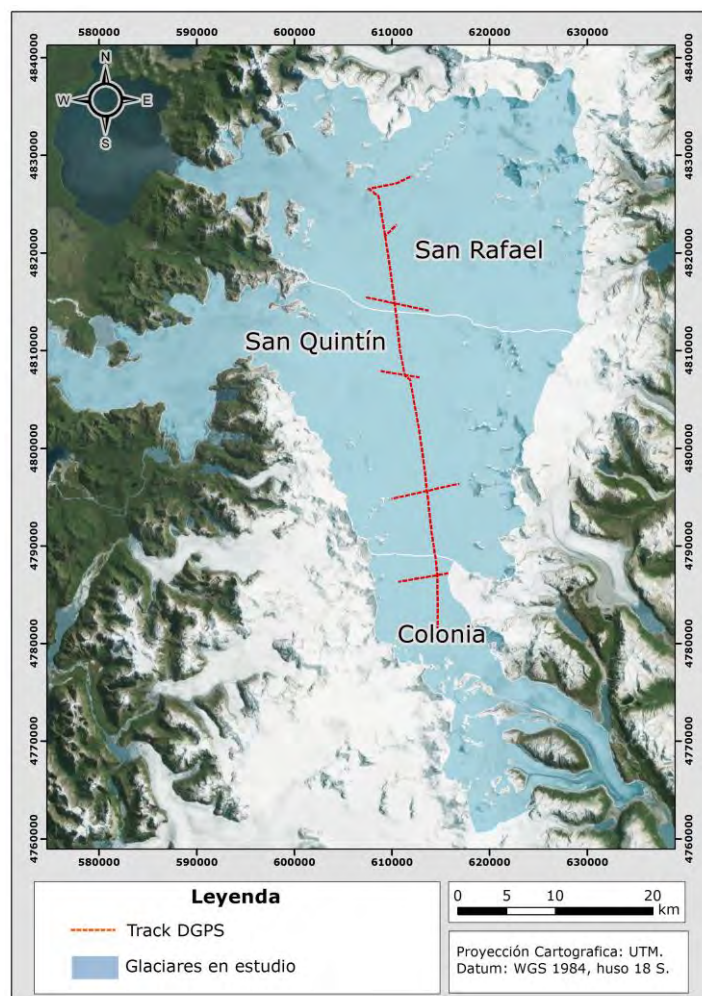


Figura 12.1-A. Área de estudio con los *tracks* DGPS establecidos originalmente en las bases del estudio en los glaciares San Rafael y Colonia.

Tabla 12.1-A. Datos DGPS disponibles para el cálculo de cambios de elevación.

AÑO	2010	2011	2013	2014
Periodo	2-4 Ago.	?	23 Ago.-3 Sep.	24-31 Ago.
Tasa de captura de datos (seg)	2	2	1	1
Fuente	DGA	DGA	Este estudio	Este estudio
Nº de puntos glaciar San Rafael	4,192	31,476	7,810	7,637
Nº de puntos San Quintín	3,870	18,816	7,911	7,694
Nº de puntos glaciar Colonia	0	3,330	2,297	9,189
Nº de puntos totales	8,062	53,622	18,018	24,520

Primero se revisó la consistencia interna de los datos DGPS cinemáticos de cada uno de los años 2010, 2011, 2013 y 2014, es decir, se examinó si existían diferencias significativas de altitud entre un dato y sus vecinos (antecesor y sucesor a lo largo del *track*). La revisión se hizo de forma manual considerando un filtro pasa alto de 1,5 m. Vale decir se eliminaron a priori los datos con diferencias de cota mayor a 1,5 m entre un punto y el punto siguiente. Ello tomando en cuenta que la pendiente media de la meseta es del orden del 1%, y por consiguiente entre dos puntos sucesivos, a una tasa GPS de captura de 1 s, 1,5 m representaría una distancia de 150 m, muy por sobre los valores reales del relieve. Estos puntos con diferencias de cota superiores a 1,5 m se pueden entonces considerar erróneos ("*outliers*"), debido probablemente a inexactitudes en el cómputo de la solución GPS.

Una vez realizada la revisión interna, se hizo una comparación entre los datos GPS de los distintos años, que denominamos aquí "cruces". Con la finalidad de tener datos fidedignos se consideró una distancia máxima entre los datos de uno y otro año, vale decir, entre datos de los periodos 2014-2010, 2014-2011, 2011-2010 y 2014-2013. Este valor fue idealmente de 20 m cuando existían suficientes cruces y 50 m cuando no existían muchos cruces. En total se obtuvieron 16.514 "cruces", vale decir, 16.514 posiciones con datos DGPS de cada par de años a una distancia entre si menor a 50 m y 20 m (según cada caso como se verá más adelante).

Cabe mencionar que se eliminaron una serie de cruces del glaciar San Rafael, específicamente los cercanos al refugio DGA, debido a que esta zona presenta pendientes importantes, mayores a lo normal del meseta principal, que influyen en la posterior comparación.

Otra limitante fue la disponibilidad de datos para el glaciar Colonia, los datos de 2011 solamente se encuentran en un sector muy acotado y los datos 2010 no alcanzan a cubrir este glaciar.

12.2. RESULTADOS

En las figuras 12.2-A y 12.2-B se muestra el perfil topográfico del glaciar San Rafael. Éste se hizo a partir de los cruces de datos entre los años 2010, 2011, 2013 y 2014, considerando solamente los valores situados en la transecta longitudinal. Se aprecia adelgazamiento de hielo mayormente en el periodo 2010-2011, en cambio, en el periodo 2013-2014 no se muestran diferencias de altura importantes.

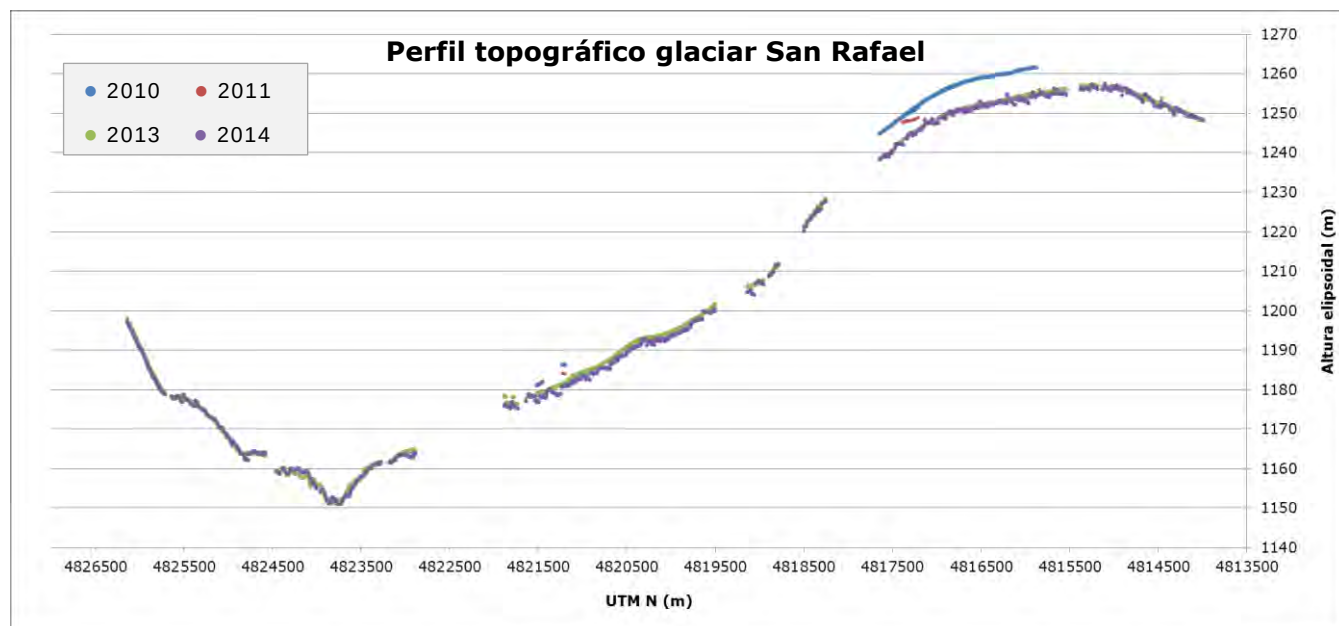


Figura 12.2-A. Perfil topográfico del glaciar San Rafael realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM N dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros.

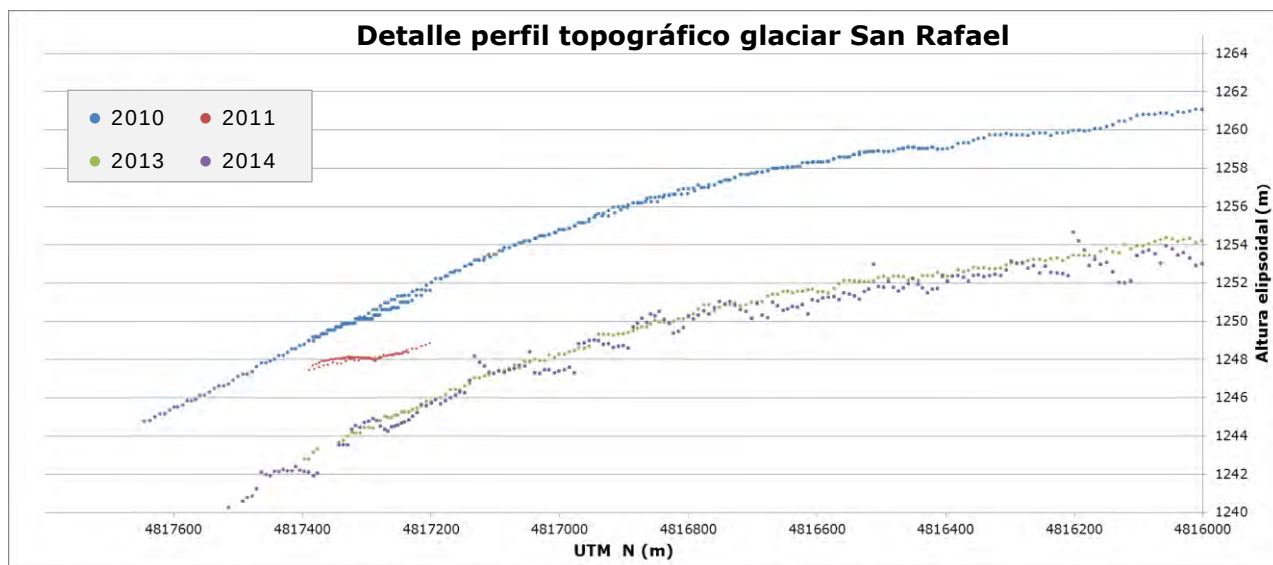


Figura 12.2-B. Detalle del perfil topográfico del glaciar San Rafael realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM norte dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros. Detalle entre coordenadas N 4.817.600 y 4.816.000 y rango altitudinal entre 1240 m y 1264 m.

En las figuras 12.2-C , 12.2-D y 12.2-E se muestra el perfil topográfico del glaciar San Quintín. Este perfil se realizó a partir de los cruces de datos entre los años 2010, 2011, 2013 y 2014, considerando solamente los valores situados en la transecta longitudinal. Los periodos 2010-2014, 2011-2014 y 2013-2014 muestran adelgazamiento de hielo, sin embargo, en el periodo y 2010-2011 y 2013-2014 es menos evidente el adelgazamiento e incluso hay zonas en donde es nulo o existe engrosamiento (ver Figs. 12.2-D y 12.2-E).

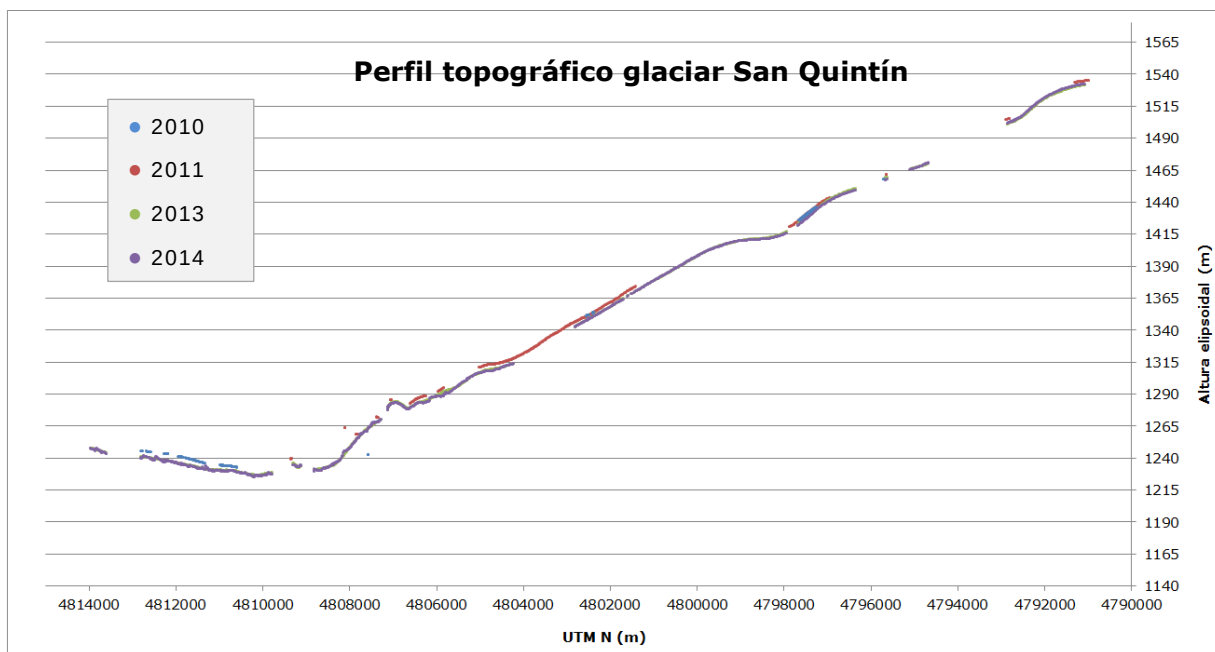


Figura 12.2-C. Perfil topográfico del glaciar San Quintín realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM N dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros.

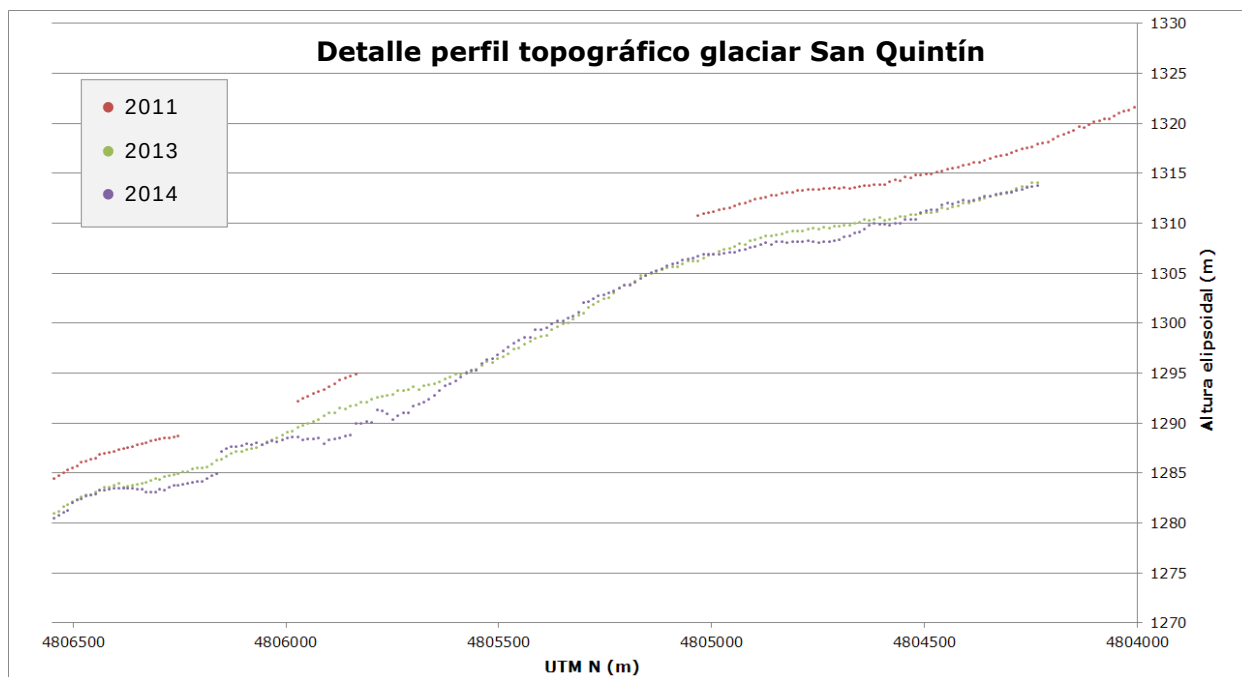


Figura 12.2-D. Perfil topográfico del glaciar San Quintín realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2011, 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM N dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros. Detalle entre coordenadas norte 4.806.500 y 4.804.000 y rango altitudinal de 1270 m a 1330 m.

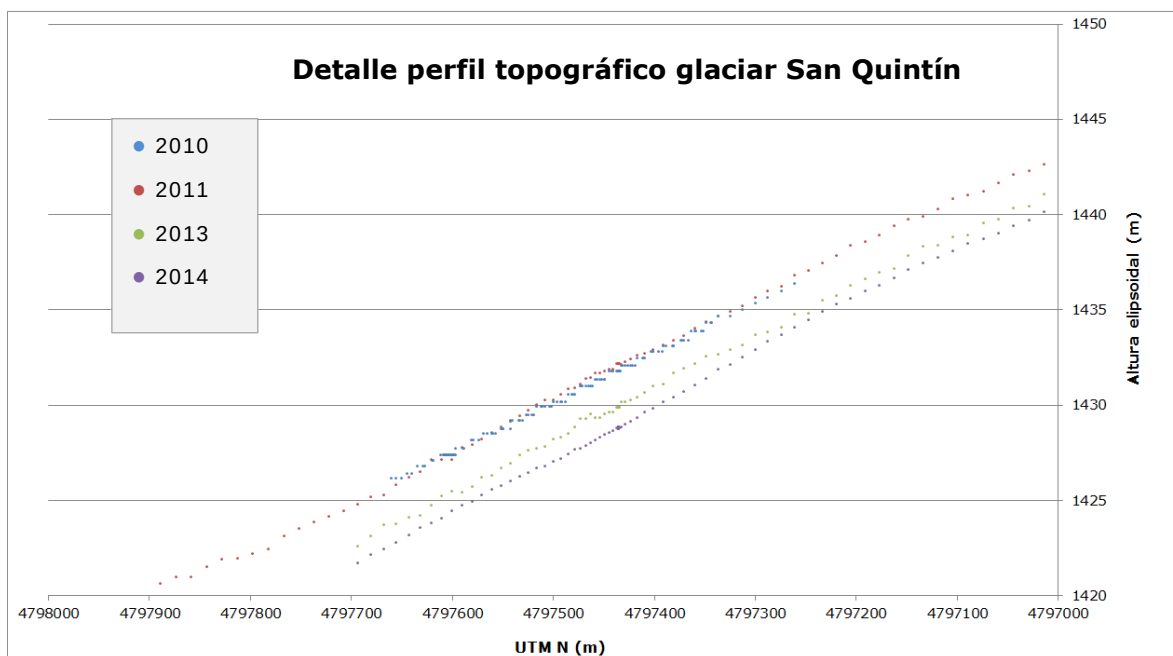


Figura 12.2-E. Detalle del perfil topográfico del glaciar San Quintín realizado a partir de los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2010, 2011, 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM N dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros. Detalle entre coordenadas N 4.797.000 y 4.798.000 y rango altitudinal de 1420 m a 1445 m.

Las figuras 12.2-F y 12.2-G corresponden al perfil topográfico del glaciar Colonia, éste se realizó a partir de los cruces de datos entre los años 2011, 2013 y 2014, considerando solamente los valores situados en la transecta longitudinal. Los escasos datos al año 2011 muestran adelgazamiento de hielo máximo de 2,4 m (esquina superior izquierda de Fig. 12.2-F). En el periodo 2014-2013, para la mayor parte del glaciar se muestra adelgazamiento, sin embargo, esta condición cambia en la zona baja del glaciar (hacia el sur) a partir de altitud de 1485 m donde no existe una constante en el adelgazamiento del hielo.

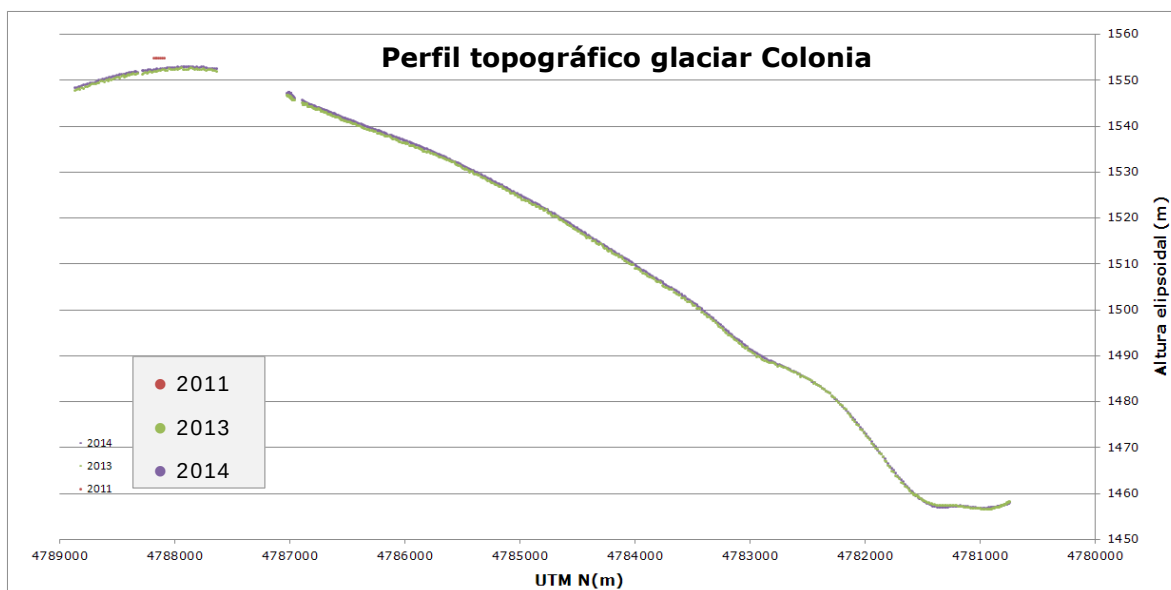


Figura 12.2-F. Perfil topografico del glaciar Colonia realizado con cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2011, 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM norte dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros.

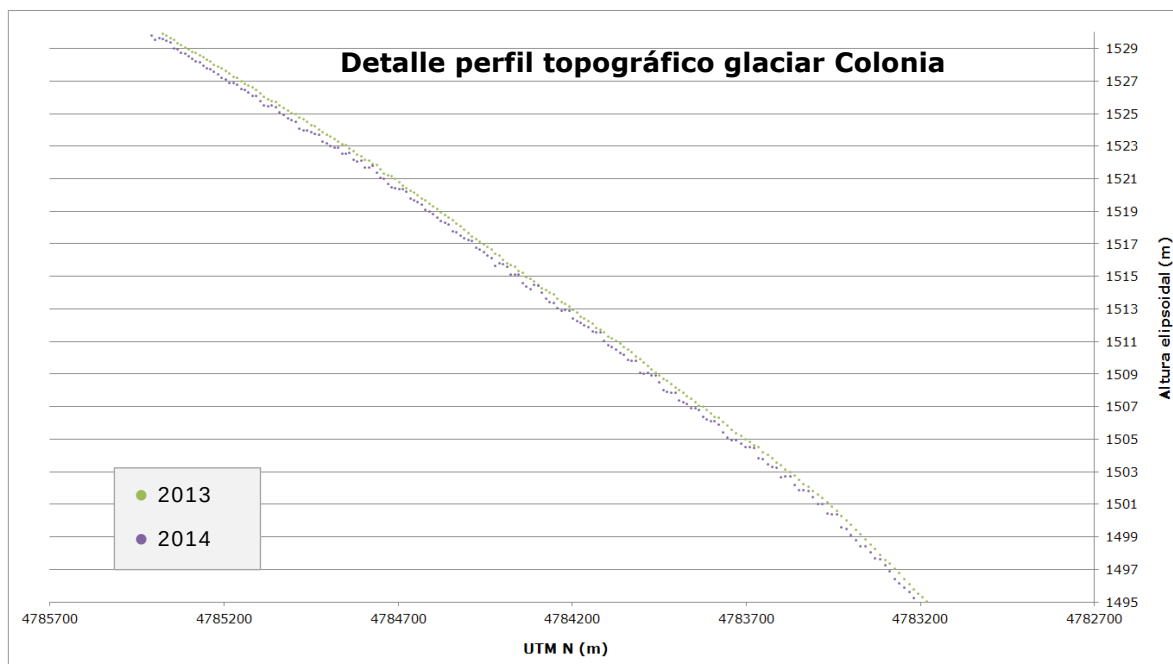


Figura 12.2-G. Detalle de perfil topográfico del glaciar Colonia realizado con los cruces DGPS de la transecta longitudinal. Los datos corresponden a los años 2013 y 2014. En el eje de las ordenadas se muestran la coordenadas UTM N dispuestas de norte a sur y en el eje de las abscisas la altura elipsoidal expresada en metros. Detalle entre coordenadas N 4.785.700 y 4.782.700 y rango altitudinal de 1530 m y 1495 m, mostrándose adelgazamiento de hielo.

12.2.1. Cambios elevación DGPS periodo 2014-2010

12.2.1.1. *Glaciar San Rafael 2014-2010*

Se empleó un radio de búsqueda de 50 m, en que se obtuvieron un total de 247 cruces. La Fig. 12.2.1.1-A muestra la diferencia entre los datos DGPS 2014 y 2010, que denominamos "delta h" (dh). El rango total de dh varía entre -8,8 m y -5 m demostrando adelgazamiento de hielo.

La Fig. 12.2.1.1-B muestra la distribución espacial de los datos, ubicados en la parte sur del glaciar, zona bastante acotada, que abarca un rango altitudinal de 1235 m a los 1255 m. Se muestra un primer conjunto de datos, en la parte norte de la figura, con valores predominantes entre -5 m y -7 m. Hacia el sur las diferencias aumentan y se muestra otro conjunto de datos con valores entre -7,1 m y -8,8 m. En la transecta, transversal 3 las diferencias son menores con valores entre -6 m y -5 m.

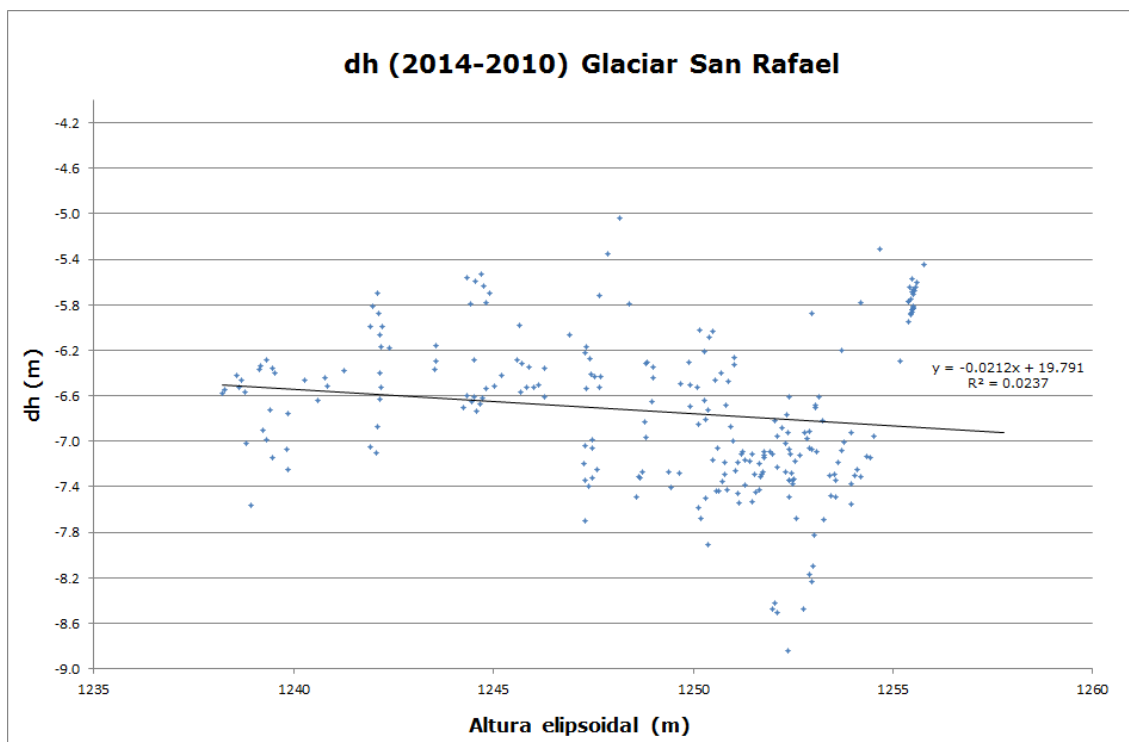


Figura 12.2.1.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Rafael. La altura elipsoidal corresponde a la del año 2014 y está referida al sistema WGS84.

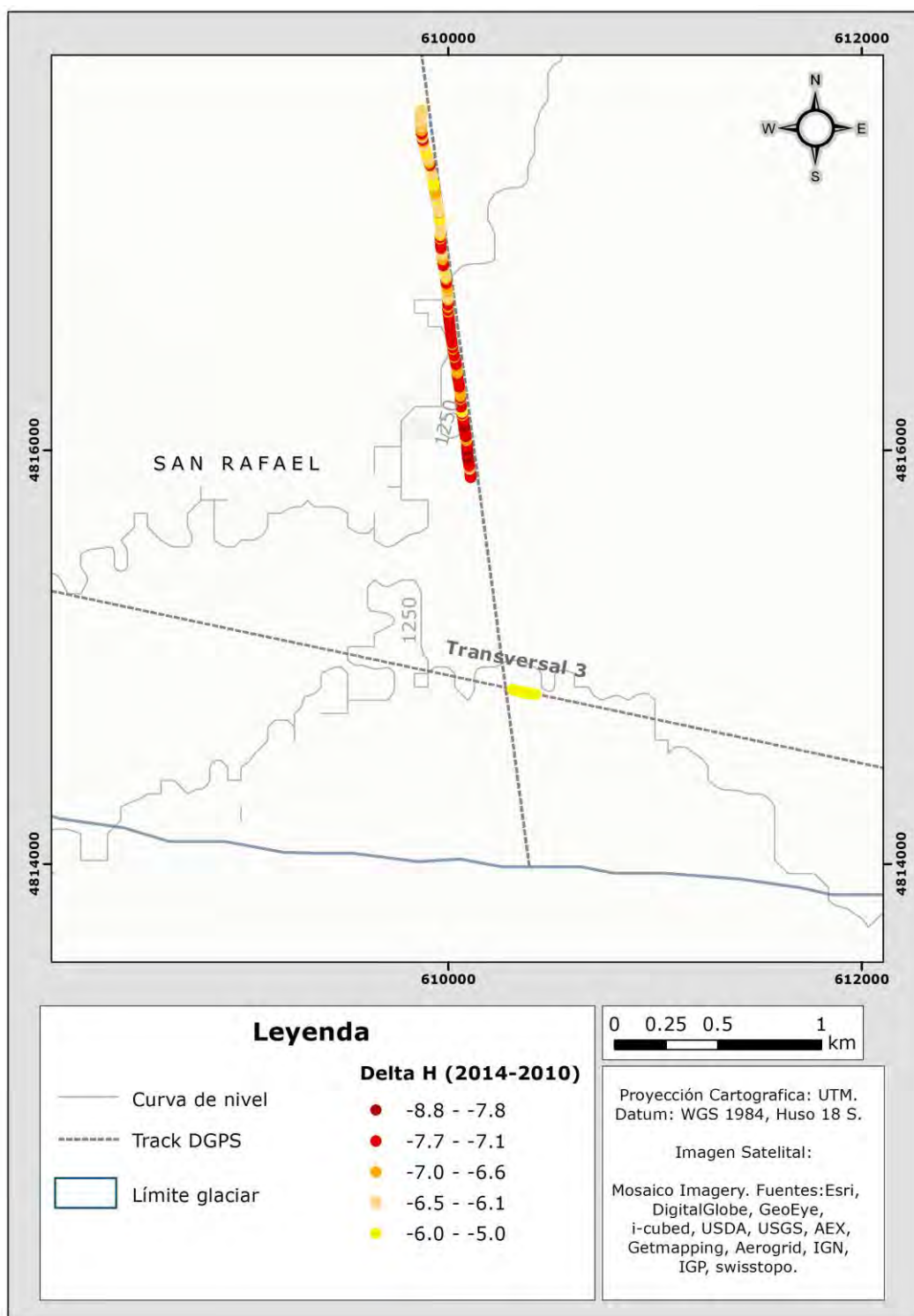


Figura 12.2.1.1-B. Distribución espacial de dh (2014-2010) en el glaciar San Rafael. La escala de colores desde burdeo a amarillo indica de mayor a menor adelgazamiento. Las curvas de nivel (altura elipsoidal) fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.1.2. **Glaciar San Quintín 2014-2010**

Se empleó un radio de búsqueda de 20 m, en que se obtuvieron un total de 479 cruces. La Fig. 12.2.1.2-A muestra la diferencia entre los datos DGPS 2014 y 2010, que denominamos "delta h" (dh). El rango total de dh varía entre -6,5 m y -2,1 m demostrando adelgazamiento de hielo. Como se puede ver en la línea de tendencia, existe un coeficiente de determinación r^2 de 0,93, con una relación inversa entre el adelgazamiento de hielo y la altitud.

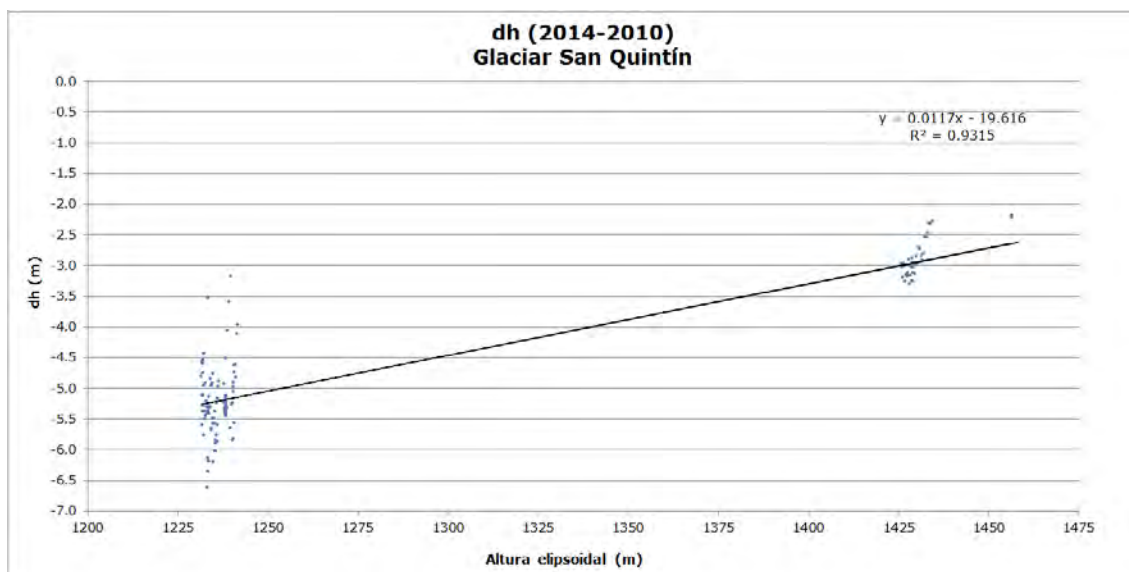


Figura 12.2.1.2-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Rafael. La altura elipsoidal corresponde a la del año 2014 y está referida al sistema WGS84.

La Fig. 12.2.1.2-B muestra la distribución espacial de los datos. En la parte norte del glaciar a lo largo de la transecta longitudinal, en un rango altitudinal entre los 1230 m a 1240 m, se localiza un primer conjunto de datos con valores dh negativos (adelgazamiento) predominantes de que van de -6,6 a -4,4 m. Hacia el sur, en la transecta transversal n° 4, a una altitud promedio de 1238 m el adelgazamiento va entre -2,2 m a -5,5 m. Posteriormente más hacia el sur, tanto en la transecta longitudinal como en la trasnversal n° 5, en un rango altitudinal de 1425 m a 1456 m, se muestran valores de adelgazamiento menores que van entre -3,4 m a -2,2 m.

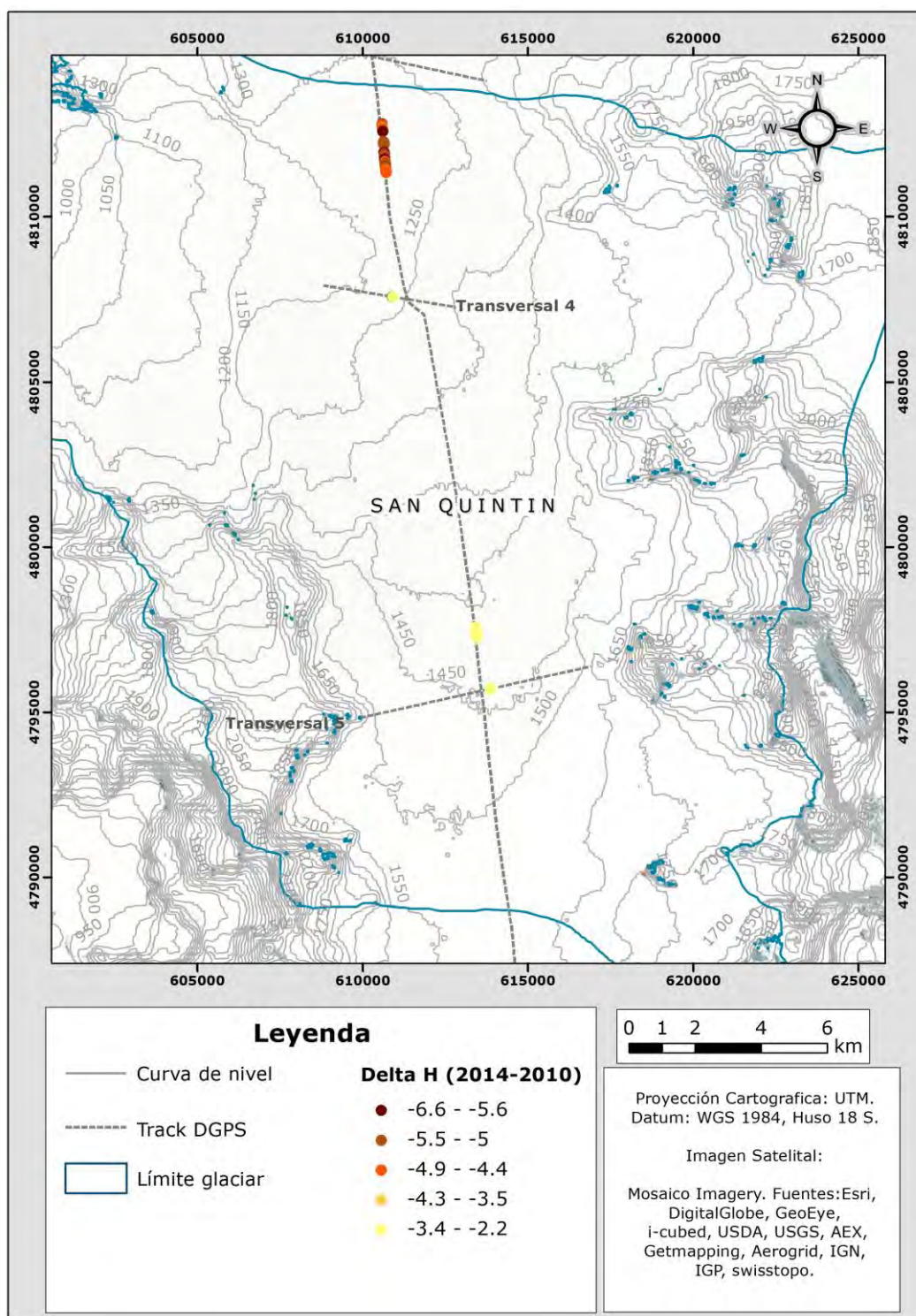


Figura 12.2.1.2-B. Distribución espacial de dh (2014-2010) en el glaciar San Quintín. La escala de colores desde burdeo a amarillo indica de mayor a menor adelgazamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.2. Cambios elevación DGPS periodo 2014-2011

12.2.2.1. *Glaciar Colonia 2014-2011*

Se empleó un radio de búsqueda de 50 m, y solo se obtuvieron 7 cruces debido a que los datos del año 2011 se localizan de forma muy acotada en el sector noreste del glaciar. En la Fig. 12.2.2.1 se muestra la diferencia entre los datos DGPS 2014 y 2011 a una altitud de 1552 m s.n.m. El rango total de dh varía entre -2,4 m y -2,1 m demostrando adelgazamiento de hielo. La Fig. 12.2.2.1-B muestra la localización de dichos cruces. Debido al bajo numero de cruces y acotada distribución areal, los valores deben ser considerados representativos solamente para esta área del glaciar.

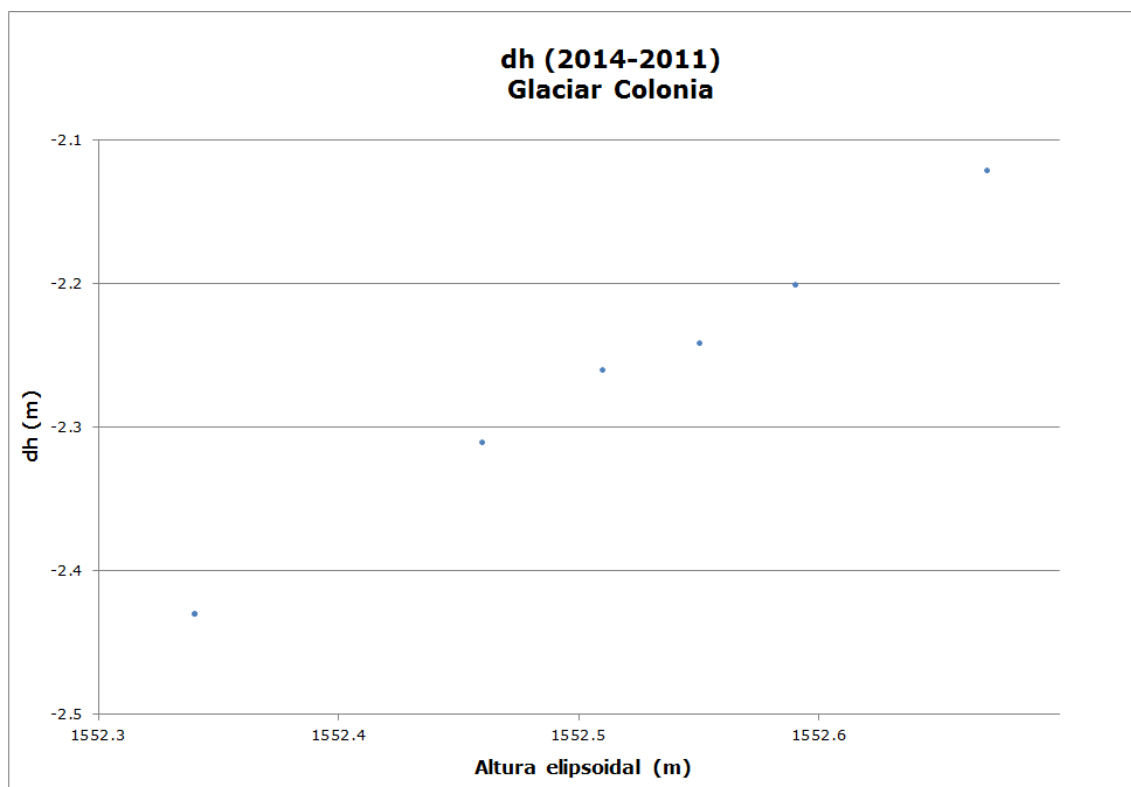


Figura 12.2.2.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2011 en el glaciar Colonia. La altura elipsoidal corresponde a la del año 2014 y está referida al sistema WGS84.

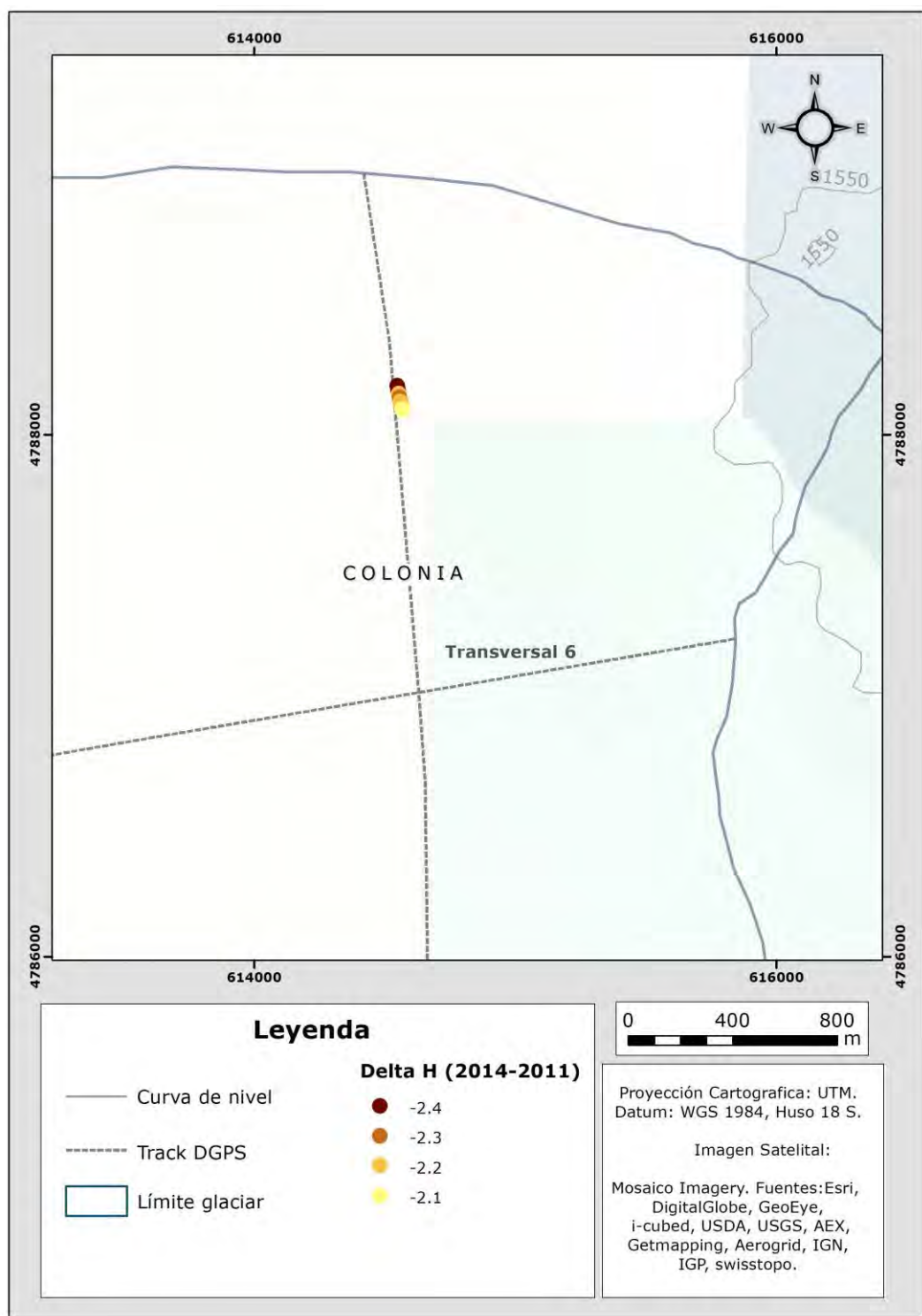


Figura 12.2.2.1-B. Distribución espacial de dh (2014-2011) en el glaciar Colonia.
La escala de colores desde burdeo a amarillo indica de mayor a menor adelgazamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.3. Cambios de elevación DGPS periodo 2011-2010

12.2.3.1. *Glaciar San Rafael 2011-2010*

Se empleó un radio de búsqueda de 20 m con el cual se obtuvo un total de 408 cruces. La Fig. 12.2.3.1-A muestra la diferencia entre los datos DGPS 2011 y 2010. El rango total de dh varía entre -2,3 m y -1,7 m demostrando adelgazamiento de hielo.

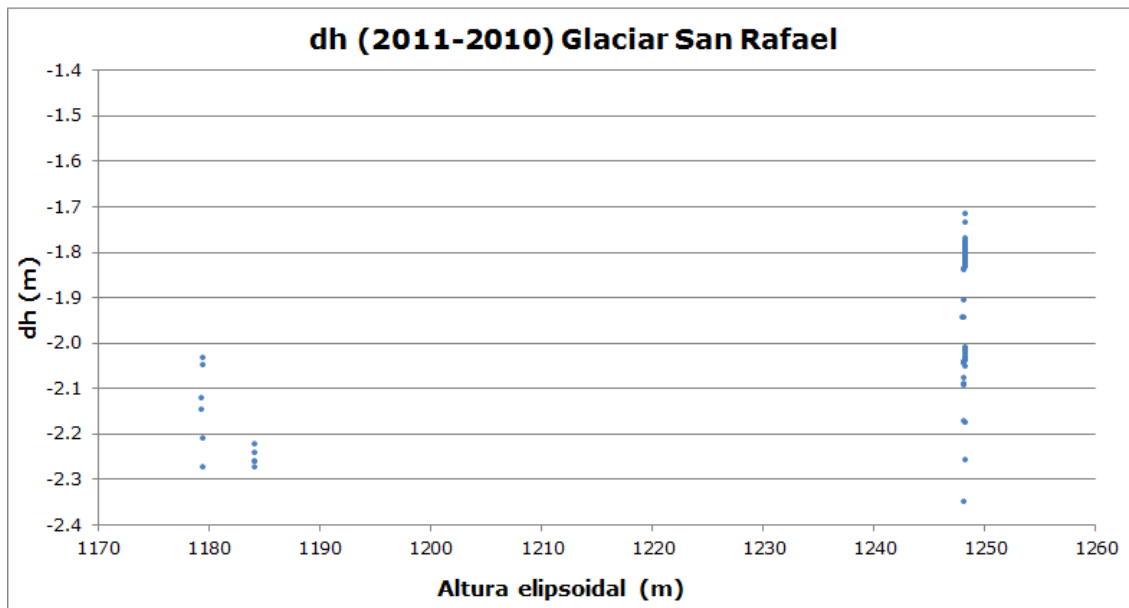


Figura 12.2.3.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2011 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Rafael. Valores negativos indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2011 y está referida al sistema geodésico WGS84.

La Fig. 12.2.3.1-B muestra la distribución espacial de los datos. En el norte de la figura, próximo a la trasecta transversal n°2, se presentan dos pequeños conjuntos de datos con valores cercanos a -2 m, luego en el sur de la figura se muestra otro conjunto con valores de -2,3 m a -1,7 m.

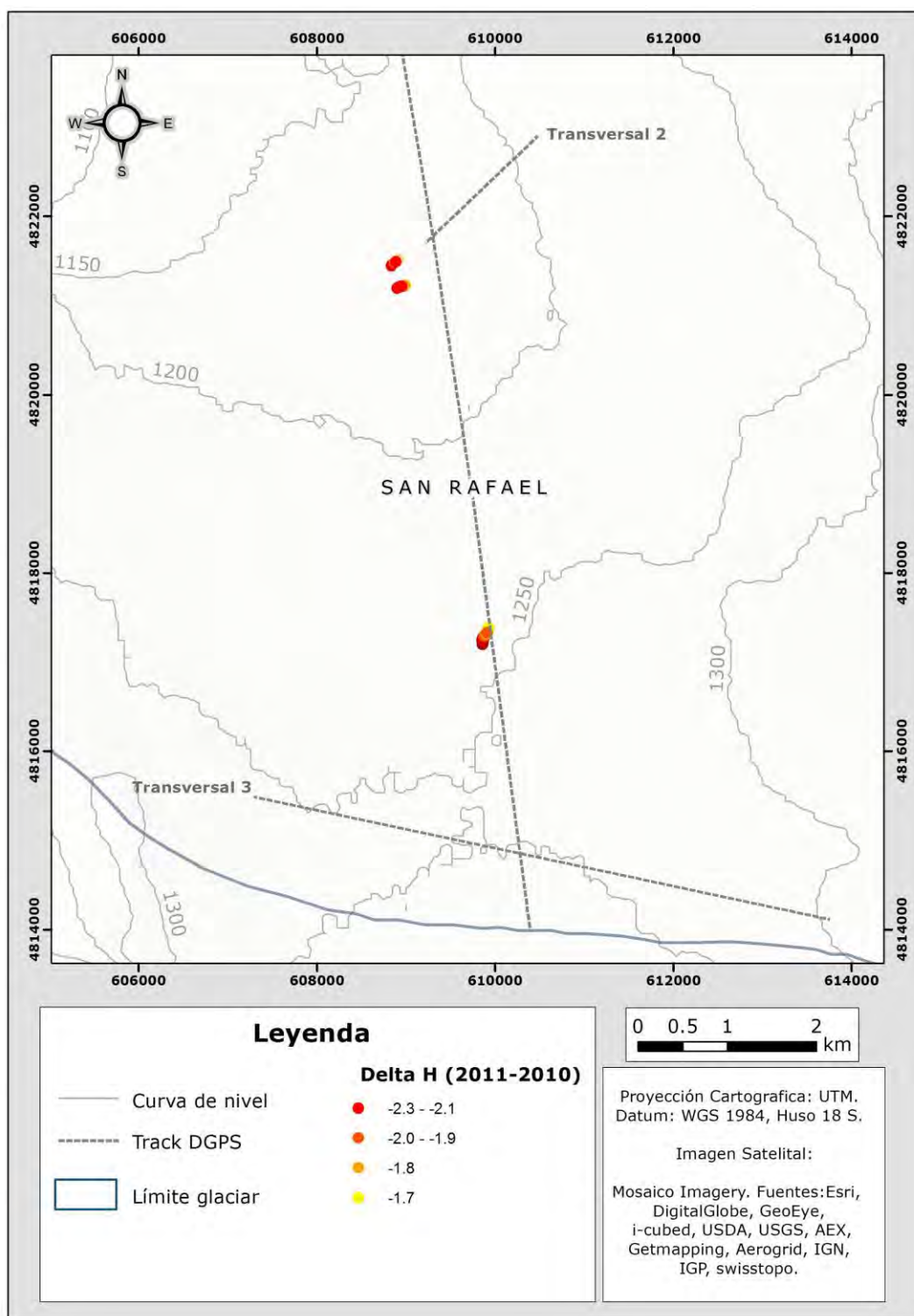


Figura 12.2.3.1-B. Distribución espacial de dh (2011-2010) en glaciar San Rafael. La escala de colores desde rojo a amarillo indica de mayor a menor adelgazamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.3.2. **Glaciar San Quintín 2011-2010**

Se empleó un radio de búsqueda de 20 m con el cual se obtuvo un total de 943 cruces. La Fig. 12.2.3.2-A muestra la diferencia entre los datos DGPS 2011 y 2010. El rango total de dh varía entre -1,4 y 0,5 m demostrando mayormente adelgazamiento de hielo. Como se puede ver en la línea de tendencia, existe un coeficiente de determinación r^2 de 0,78, con una relación inversa entre el adelgazamiento de hielo y la altura.

La Fig. 12.2.3.2-B muestra la distribución espacial de los datos. En el norte de la figura se presenta un primer conjunto de datos con los mayores adelgazamientos, predominando valores entre -1,5 m y -1 m, a una altura promedio de 1231 m s.n.m. Más hacia el sur, a medida que aumenta la altura, los valores de adelgazamiento son menores, e incluso existe engrosamiento con valores que van desde -0,75 m a 0,25m a una altura promedio de 1354 m s.n.m. Un último grupo, en el extremo sur de la figura (altitud promedio de 1429 m s.n.m) presenta valores que van de -0,5 m a 0,5 m.

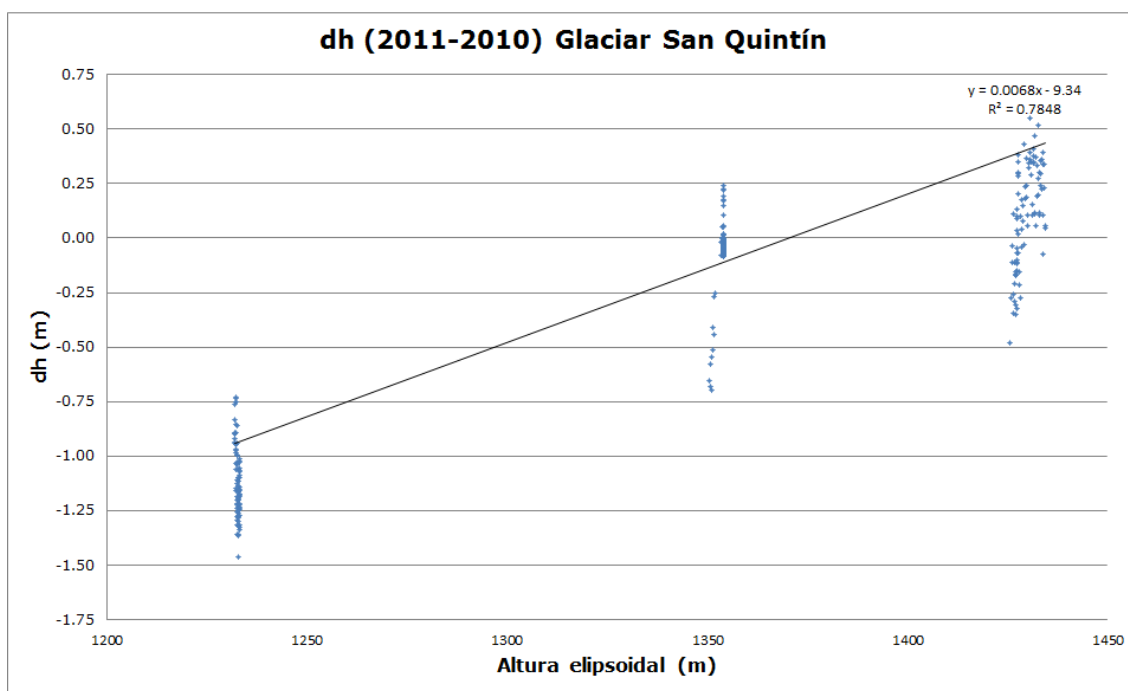


Figura 12.2.3.2-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2011 y los datos DGPS de 2010 en el glaciar San Quintín. Valores negativos indican adelgazamiento y valores positivos engrosamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2011 y está referida al sistema geodésico WGS84.

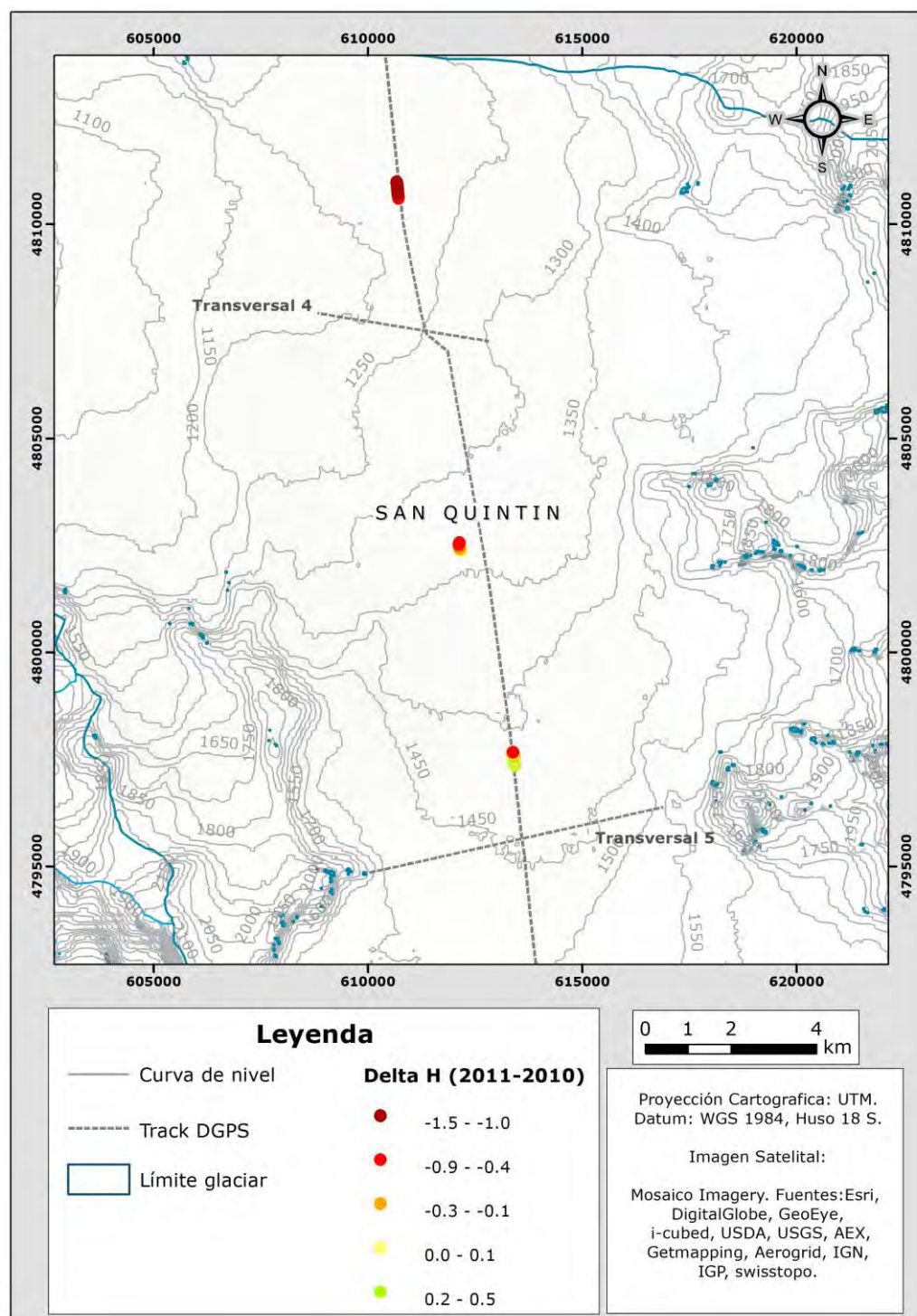


Figura 12.2.3.2-B. Distribución espacial de dh (2011-2010) en el glaciar San Quintín. La escala de colores desde burdeo a naranja indica de mayor a menor adelgazamiento y colores de amarillo a verde claro menor a mayor engrosamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.4. Cambios elevación DGPS periodo 2014-2013

La Fig. 12.2.4-A muestra la diferencia entre los datos DGPS 2014 y 2013. Se empleó un radio de búsqueda de 20 m. El rango total de dh varía entre +2,1 m y -3,9 m, con una mayoría (68%) de los cruces (14.358 cruces en total) correspondientes a valores positivos (es decir engrosamiento) entre 0 y +2,9 m.

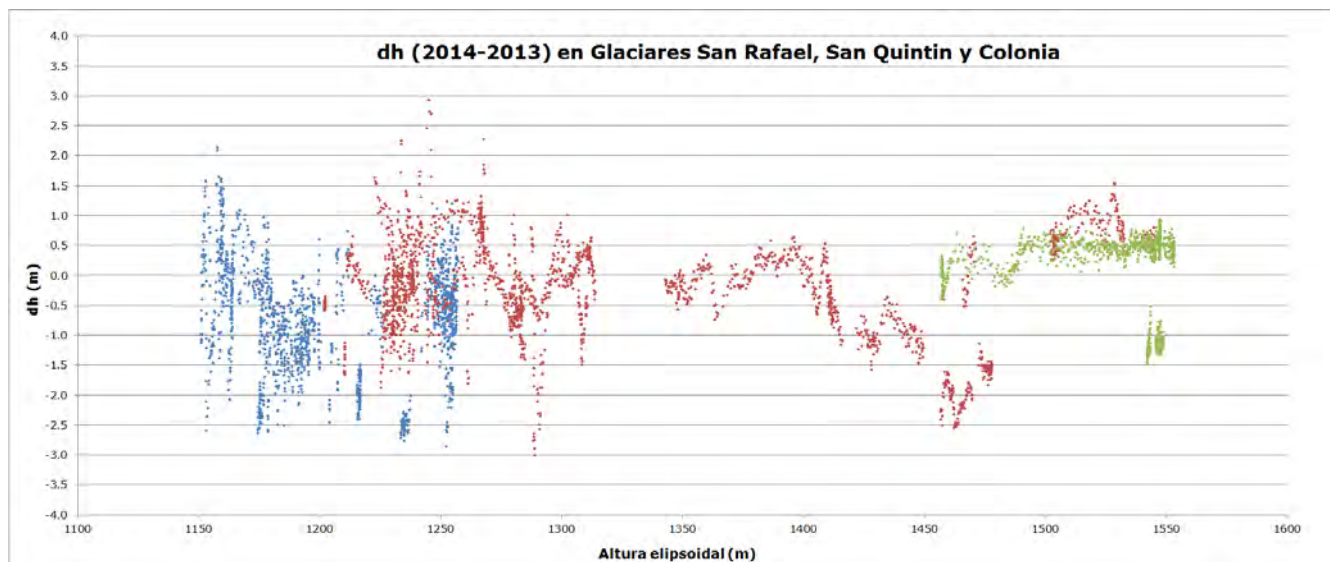


Figura 12.2.4-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013. En azul datos del glaciar San Rafael (ver ampliación en Figura 12.2.4.1-A), en rojo datos del glaciar San Quintín (ver ampliación en Figura 12.2.4.2-A) y en verde datos del glaciar Colonia (ver ampliación en Figura 12.2.4.3-A). Valores positivos representan engrosamiento y valores negativos indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a los datos de 2014 y está referida al sistema geodésico WGS84.

12.2.4.1. San Rafael 2014-2013

En la Fig. 12.2.4.1-A se grafican los dh 2014-2013 en el glaciar San Rafael con un total de 2.330 cruces. Se empleó un radio de búsqueda de 20 m. El dh máximo es de +2,1 m y el mínimo de -2,8 m. La mayor parte de los valores (87%) son negativos (adelgazamiento de hielo). Estos últimos no muestran una correlación con la altitud y se distribuyen a lo largo de todo el perfil del glaciar. Los valores máximos de adelgazamiento se encuentran a una altitud cercana a los 1.200 m, mientras que los valores máximos de engrosamiento ocurren cercanos a los 1.150 m. La Fig. 12.2.4.1-B

ilustra la distribución espacial de las diferencias de altura entre el 2014 y 2013. Se aprecia en esta figura que los valores mínimos cercanos a -2,8 m se encuentran en las transectas transversales, como también en la parte media de la transecta longitudinal. En cambio los valores máximos cercanos a +2,1 m se localizan mayormente en la parte norte, y también otro conjunto en la parte sur (límite con el glaciar San Quintín), todos en la transecta longitudinal.

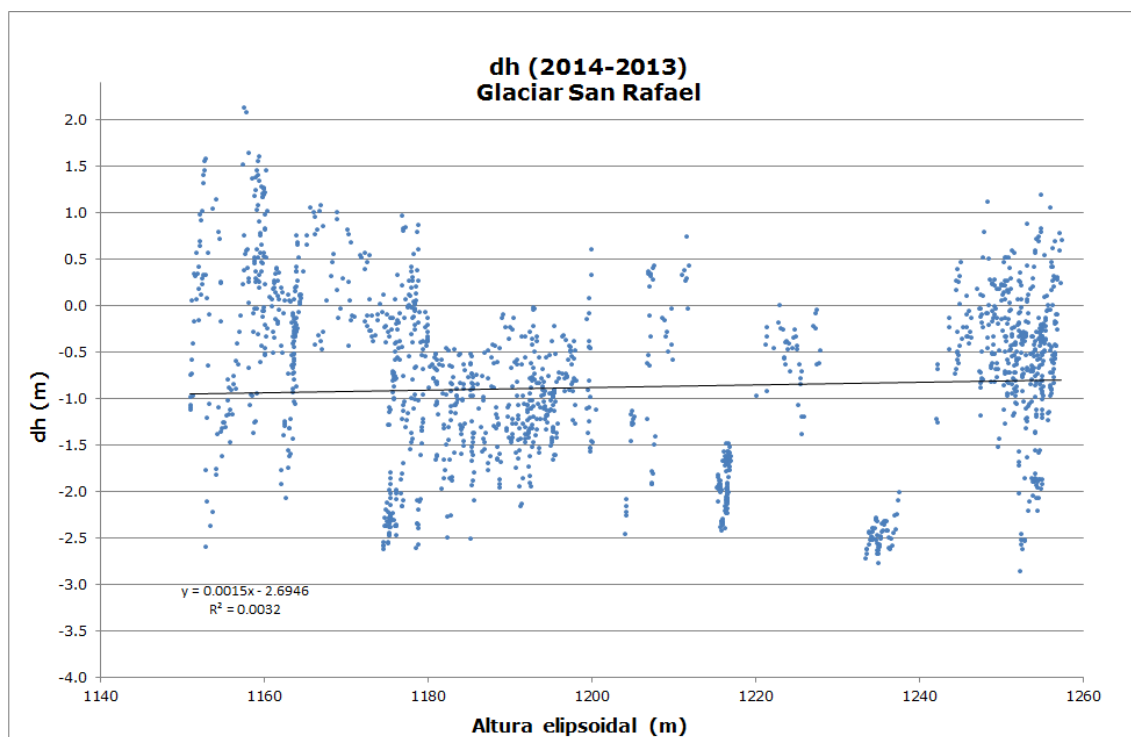


Figura 12.2.4.1-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013 en el glaciar San Rafael. Valores positivos representan engrosamiento y valores negativos indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2014 y está referida al sistema geodésico WGS84.

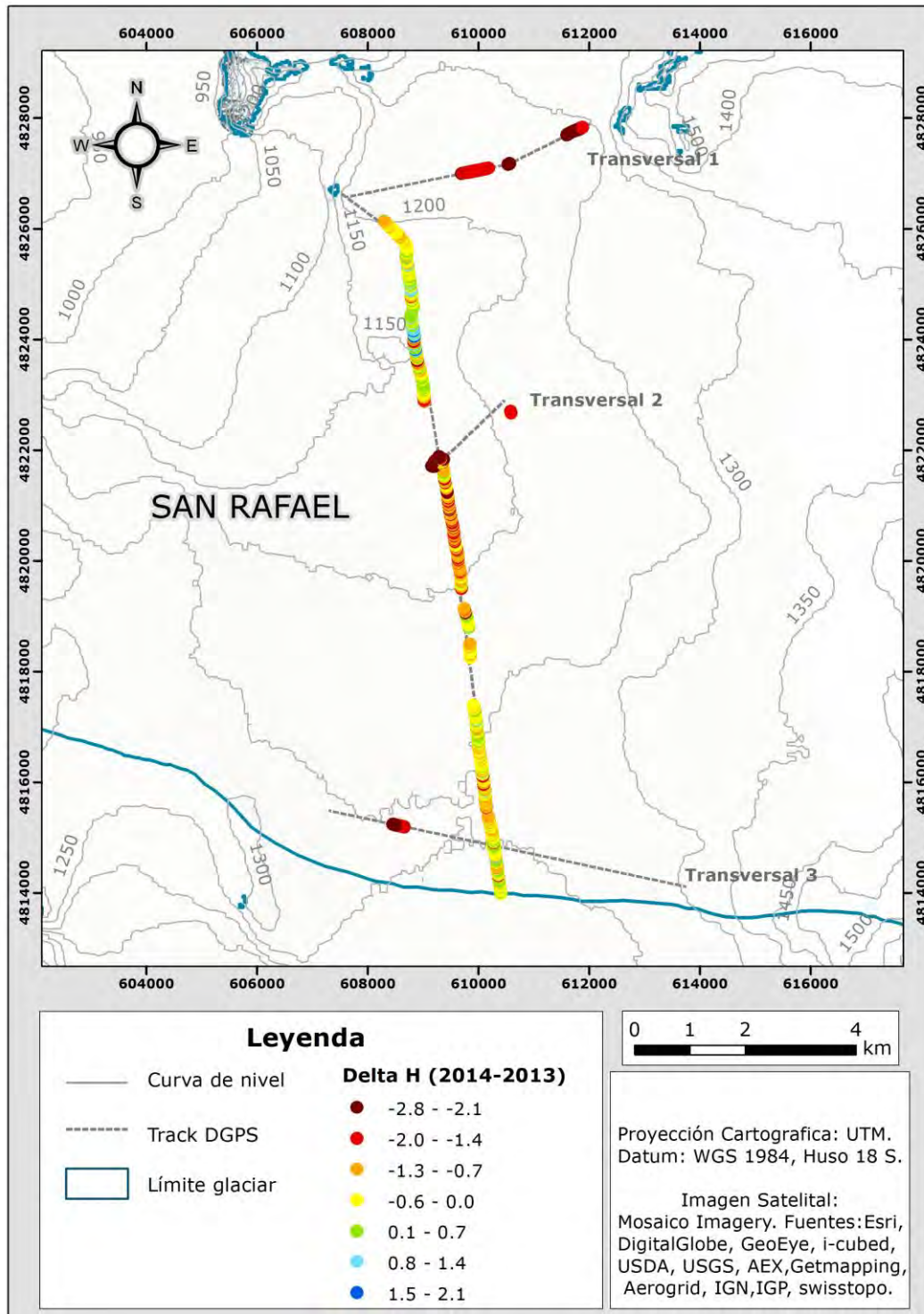


Figura 12.2.4.1-B. Distribución espacial de dh (2014-2013) en el glaciar San Rafael. Valores de rojo a naranja equivalen a adelgazamientos y valores de verde a celeste a engrosamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.4.2. **Glaciar San Quintín 2014-2013**

En la Fig. 12.2.4.2-A se grafican los dh 2014-2013 en el glaciar San Quintín con un total de 4.485 cruces. Se empleó un radio de búsqueda de 20 m. El dh máximo es de +2,9 m y el mínimo de -3 m. La mayor parte de los valores (70%) son negativos (adelgazamiento de hielo) y no muestran una correlación con la altitud, distribuyéndose a lo largo de casi todo el perfil del glaciar, exepctuando la zona por sobre la altura elipsoidal de 1500 m. Los valores máximos de adelgazamiento se encuentran a una altura cercana a los 1290 m, mientras que los valores máximos de engrosamiento ocurren cercanos a los 1240 m.

La Fig. 12.2.4.2-B ilustra la distribución espacial de las diferencias de altura entre el 2014 y 2013. Se aprecia en esta figura que los valores mínimos cercanos a -3 m se encuentran mayormente en la transecta transversal nº 5, como también unos 2,5 km desde esta transecta hacia el norte en la transecta longitudinal. Siguiendo en esta misma dirección, los valores cambian hasta mostrar valores neutros y de engrosamiento en la parte media de la transecta longitudinal. En el extremo norte del glaciar, vale decir, los valores sobre la transecta transversal nº4 y unos 3,4 km al sur de ésta se presentan valores disparejos que van de los -3,1 m a los +2,9 m. Por otra parte, en el sector sur del glaciar se muestra engrosamiento con valores predominantes entre +0.4 m a +2.9 m.

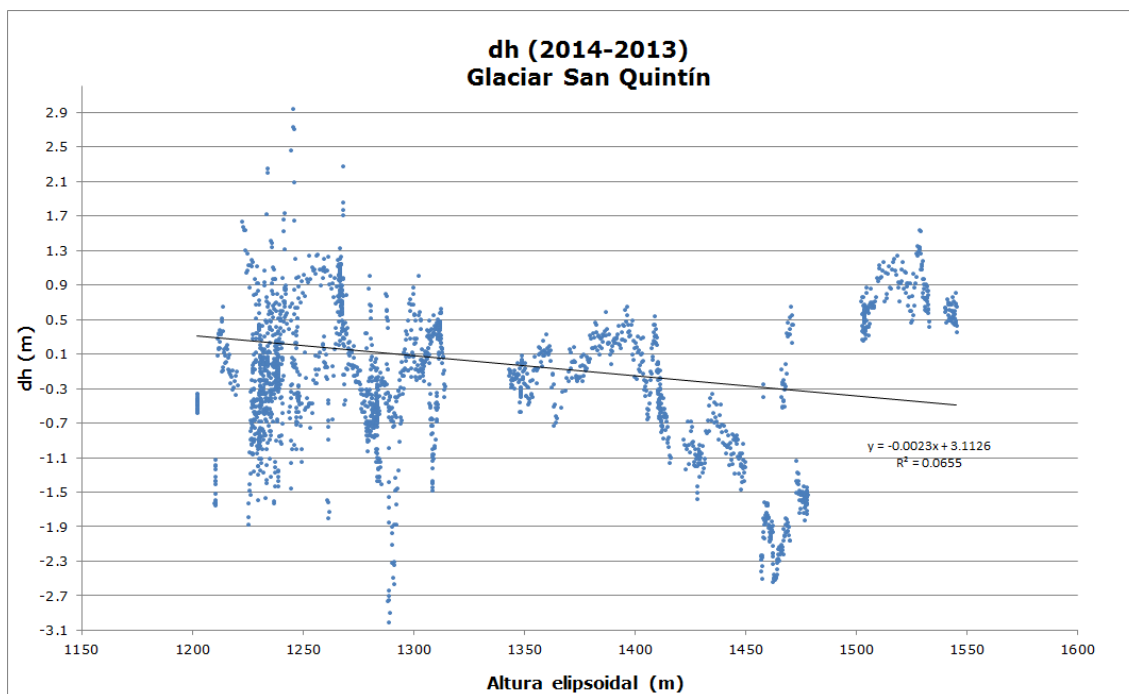


Figura 12.2.4.2-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013 en el glaciar San Quintín. Valores positivos representan engrosamiento y valores negativos indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2014 y está referida al sistema geodésico WGS84.

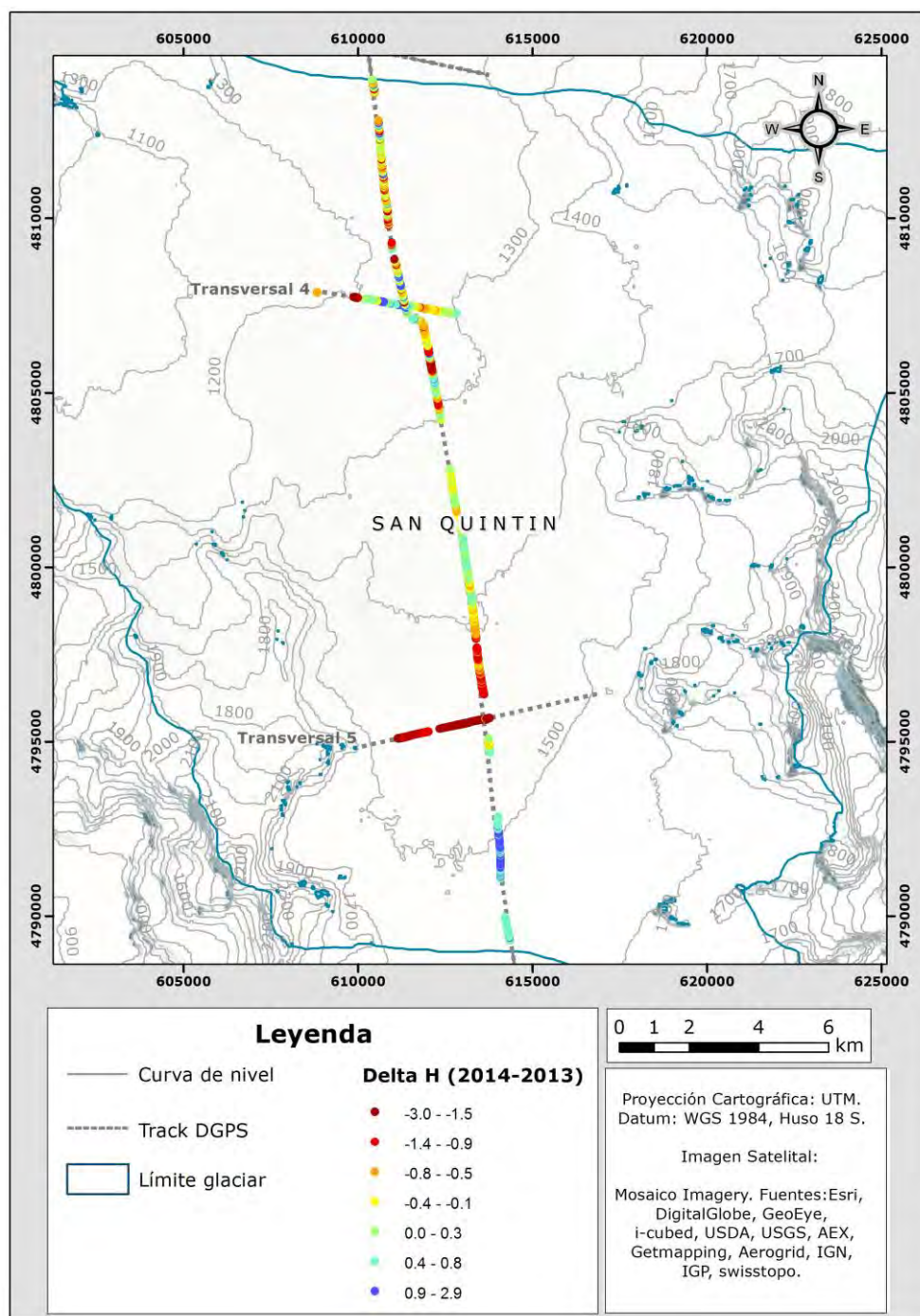


Figura 12.2.4.2-B. Distribución espacial de dh (2014-2013) en el glaciar San Quintín. Valores de rojo a naranja equivalen a adelgazamientos y valores de verde a azul a engrosamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.4.3. **Glaciar Colonia 2014-2013**

Para el glaciar Colonia se tiene una muestra de 7.543 cruces en el periodo 2014-2013. Se empleó un radio de búsqueda de 20 m. La Fig. 12.2.4.3-A grafica un dh máximo de +0,9 m y un dh mínimo de -1,4 m. La mayor parte de los valores (96%) son positivos (engrosamiento) y tienen una correlación muy baja con la altura (R^2 de 0,03). Los valores de engrosamiento (de 0 a +0,9 m) se encuentran a lo largo de todo el perfil longitudinal, exceptuando conjuntos de datos de adelgazamiento en la parte sur. Por el contrario, en la transecta transversal (conjunto de datos situado en el lado inferior izquierdo de la Fig. 12.2.4.3-B), se muestran valores diferentes, con máximos de adelgazamiento que van entre los -1,5 m y los -0,5 m.

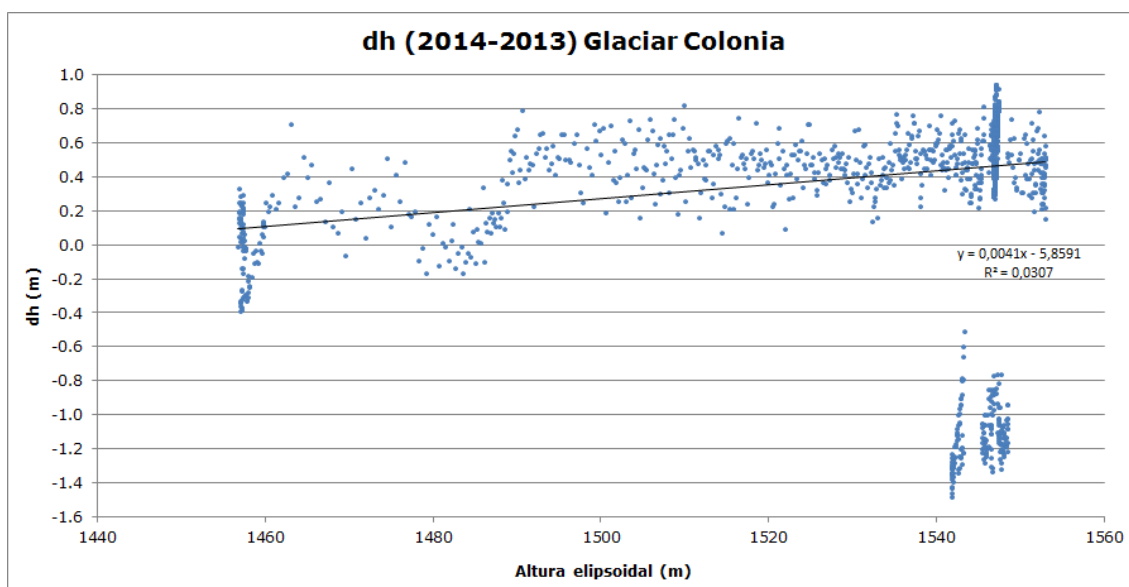


Figura 12.2.4.3-A. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2014 y los datos DGPS de 2013 en el glaciar Colonia. Valores positivos representan engrosamiento y valores negativos indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2014 y está referida al sistema geodésico WGS84.

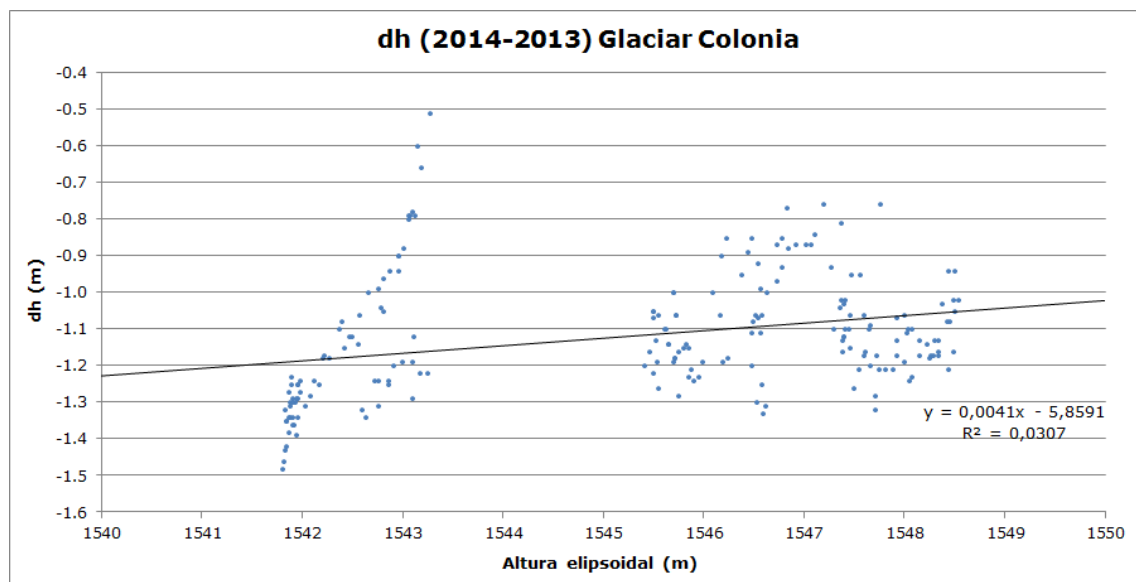


Figura 12.2.4.3-B. Detalle de diferencia de altura (dh) en transecta transversal del glaciar Colonia. Los valores se sitúan entre -1.5 y -0.5 m e indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2014 y está referida al sistema geodésico WGS84.

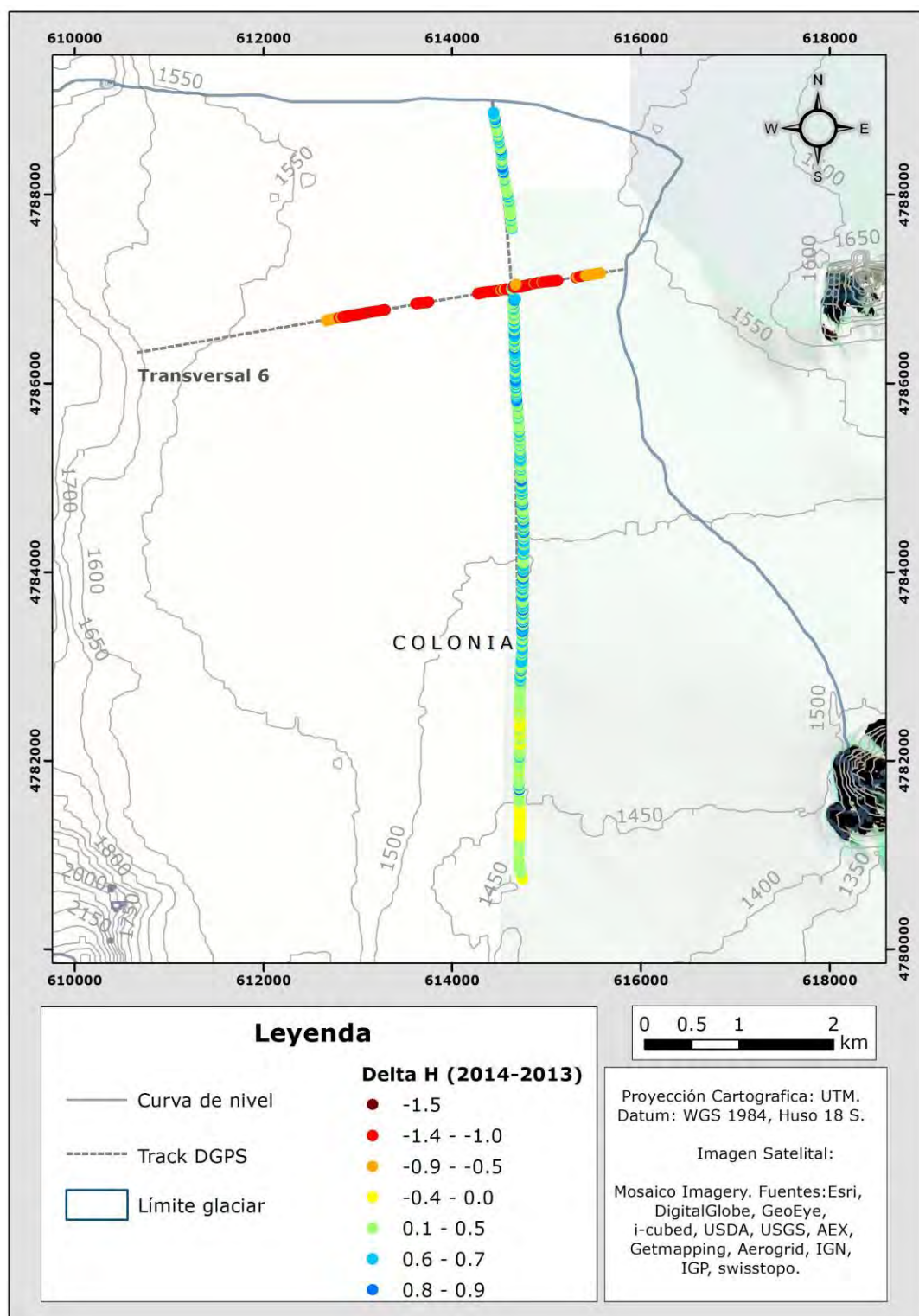


Figura 12.2.4.3-C. Distribución espacial de dh (2014-2013) en glaciario Colonia. Valores de burdeo a amarillo equivalen a adelgazamientos y valores de verde a engrosamiento. Las curvas de nivel fueron construidas con el modelo de elevación SRTM.

12.2.5. Resumen cambios de elevación con datos DGPS

La Tabla 12.2.5-A muestra el resumen de los valores de dh obtenido para cada par de épocas.

Tabla 12.2.5-A. Valores de dh para cada par de épocas y estadísticas respectivas de los cruces. Promedios de dh negativos indican adelgazamiento, mientras que promedios positivos corresponden a engrosamiento. Sigma dh denota la desviación estándar del conjunto de cruces. ND indica que no hay datos. DNO indica "datos no ocupados", que corresponden a periodos con datos, pero no fueron ocupados para evitar la redundancia en el análisis.

PERIODO	Intervalo	Glaciar San Rafael			Glaciar San Quintín			Glaciar Colonia		
		Nº cruces	dh promedio	Sigma dh	Nº cruces	dh promedio	Sigma dh	Nº cruces	dh promedio	Sigma dh
	años		m	m		m	m		m	m
2014-2010	4	247	-6,74	0,67	479	-3,52	1,01	ND	ND	ND
2014-2011	3	DNO	DNO	DNO	DNO	DNO	DNO	7	-2,3	0,12
2011-2010	1	408	-1,83	0,09	943	-0,14	0,342	ND	ND	ND
2014-2013	1	2330	-0,88	0,84	4.485	0,01	0,81	7543	0,45	0,32

Se aprecia que en el periodo 2014-2013, cuando existe un mayor número de cruces, los cambios de elevación no son realmente significativos respecto de la variabilidad de los datos. Esto ocurre con el glaciar San Quintín que tiene un engrosamiento promedio de apenas $+0,01$ m, aunque se aprecia un leve adelgazamiento de $0,9 \pm 0,8$ m en el glaciar San Rafael, y un leve engrosamiento de $0,5 \pm 0,3$ m en el glaciar Colonia. En el periodo 2011-2010 se aprecian adelgazamientos de $1,8 \pm 0,1$ m el glaciar San Rafael, considerándose una reducción significativa, en cambio, para el glaciar San Quintín el adelgazamiento es poco significativo con valores de $-0,1 \pm 0,3$ m. En el periodo 2014-2011 se aprecia para el glaciar Colonia un adelgazamiento de $-2,2 \pm 0,1$ m, sin embargo, no es representativo para todo el glaciar (7 cruces). Finalmente, para el periodo 2014-2010 se observa en el glaciar San Rafael un adelgazamiento significativo de $6,7 \pm 0,7$ m y para el glaciar San Quintín una reducción de $3,52 \pm 1$ m. Para los diferentes periodos no se aprecian tendencias altitudinales de adelgazamiento o engrosamiento, con excepción a los periodos 2011-2011 y 2014-2010 del glaciar San Quintín.

Los resultados apuntan a que la zonas de acumulación de la mesetas de los glaciares San Rafael, San Quintín y Colonia están adelgazándose.

Para incrementar la exactitud de estas comparaciones se sugiere reprocesar los datos GPS utilizando un programa de procesamiento común, y verificando que la posición de la(s) estación(es) de referencias sean calculadas con el mismo método. Ello considerando que distintas instituciones capturaron los datos GPS con distintos equipos, diferentes modos de medición y de procesamiento.

13. CAMBIOS DE ELEVACIÓN MEDIANTE DATOS LIDAR

13.1. METODOLOGÍA

Se compararon datos LIDAR, provistos por la DGA (Tabla 13.1-A), para determinar los cambios de elevación de la superficie en la zona de acumulación de los glaciares San Rafael y Colonia (Figura 13.1-A). La zona de acumulación de estos glaciares corresponde a un polígono que encierra el área de la cuenca (Figura 13.1-A) sobre la cota de 1000 m s.n.m. para el glaciar San Rafael y 1300 m s.n.m. para el glaciar Colonia (Rivera et al., 2007; Barcaza *et al.*, 2009) (Tabla 13.1-B).

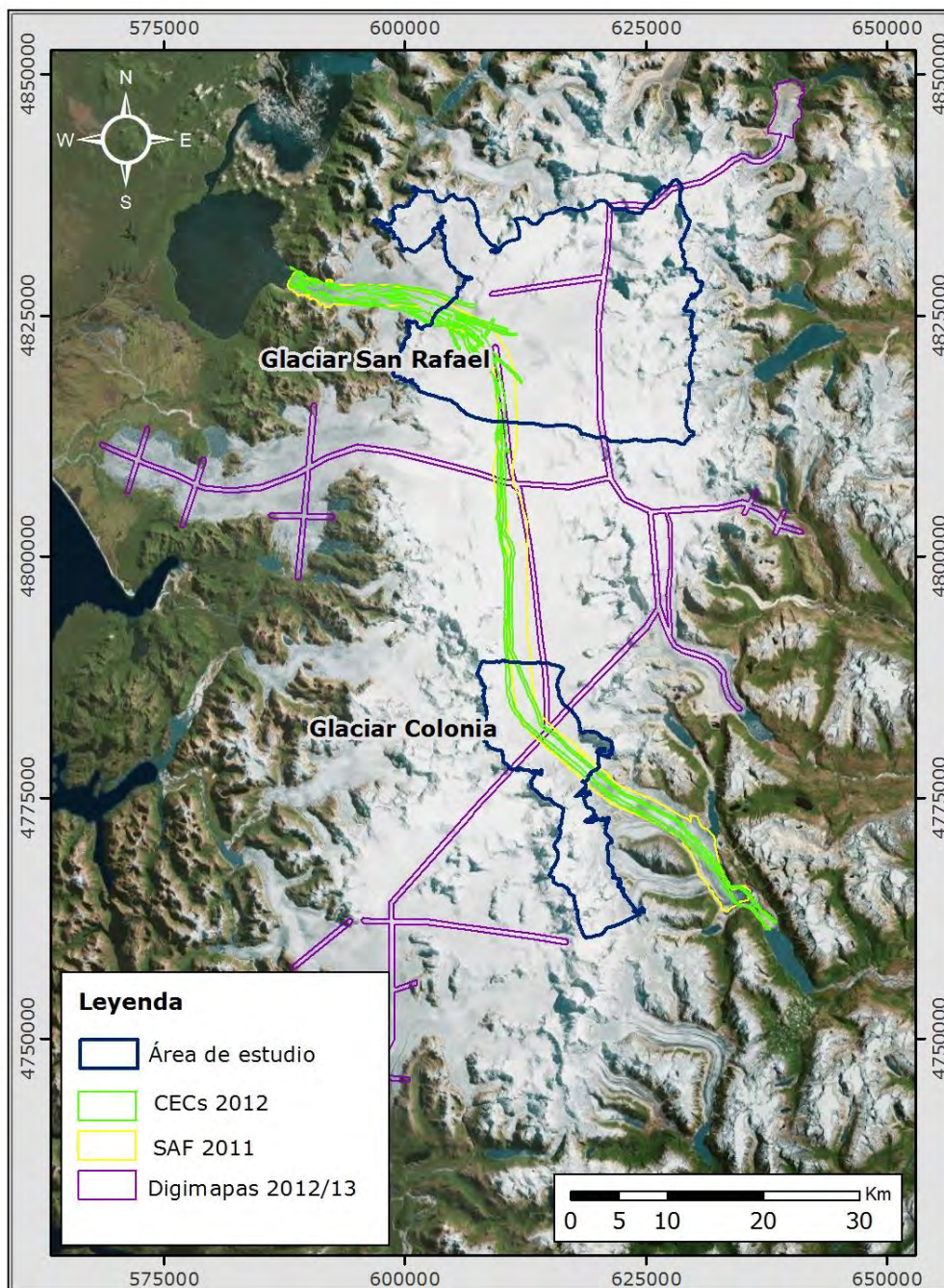


Figura 13.1-A. Área de estudio en la zona de acumulación de los glaciares San Rafael y Colonia y ubicación de datos LIDAR proporcionados por la DGA. La imagen de fondo corresponde a una Landsat 8 del 18 de enero 2014, composición falso color bandas 6, 5, 4 resolución espacial de 30 m, más banda pancromática con resolución de 15 m.

Tabla 13.1-A. Datos LIDAR provistos por la DGA.

Vuelo	Fecha	Datum	Altura	Densidad (ptos./m²)	Resolución original DEM (m)
SAF	Agosto 2011	WGS84	Elipsoidal	0,02	5
CECs	Agosto 2012	WGS84	Elipsoidal	0,13	5
CECs	Agosto 2012	WGS85	Elipsoidal	0,58	5
Digimapas	Noviembre 2012	WGS84	Geoidal	-	1
Digimapas	Enero 2013	WGS84	Geoidal	-	1

Para determinar los cambios de elevación (DH) en el área de estudio (Figura 13.1-A), se realiza la diferencia entre dos sets de datos, a través de un procedimiento de resta de DEMs en las áreas donde existe traslape de los datos LIDAR (Fig. 13.1-A), utilizando la siguiente fórmula:

$$Y = B1 - B2$$

Donde; $Y = DH$

$B1$ = DEM de la época más reciente

$B2$ = DEM de la época anterior

En este caso se utilizaron los DEMs provistos por la DGA con resolución de 1 m y 5 m (Tabla 13.1-A). En el DEM Digimapas se realizó una degradación se la resolución espacial a 5 m para mantener las mismas características geométricas de los otros sets de datos.

Tabla 13.1-B. Elevación de la línea de equilibrio (m s.n.m.).

Fuente	Gl. San Rafael	Gl. Colonia
Rivera <i>et al.</i> , 2007	1013	1302
Barcaza <i>et al.</i> , 2009	900	1270
Landsat 8 18-01-2014	1000	1300

13.2. RESULTADOS

Para la zona de acumulación de los glaciares Colonia y San Rafael, se calculó la diferencia de altura (DH) correspondiente a un periodo de aproximadamente un año, entre agosto de 2011 (LIDAR SAF 2011) y agosto de 2012 (LIDAR CECs 2012) y el periodo entre agosto de 2012 (LIDAR CECs 2012) y noviembre 2012 o Enero 2013 (LIDAR Digimapas) que corresponde a la primavera del ciclo 2012-2013 (Tabla 13.2-A).

En la Tabla y Fig. 13.2-A se presentan los resultados obtenidos en la comparación de los DEM LIDAR para los glaciares San Rafael y Colonia en la franja donde se intersectan las mediciones efectuadas durante los periodos señalados.

Tabla 13.2-A. Resultados de la diferencia de altura (dh) obtenida en la comparación de los DEM LIDAR en el área de estudio.

Glaciar	San Rafael		Colonia	
	CECs2012-SAF2011	Digimapas2012-2013-CECs2012	CECs2012-SAF2011	Digimapas2012-2013-CECs2012
dh DEMs				
dh mínimo	-15,28	-4,52	-12,77	-4,31
dh máximo	17,35	-2,68	7,03	-0,09
dh medio	-1,08	-3,74	0,60	-3,00
Desviación estándar	1,32	0,28	0,73	1,16
Número de cruces	477.581	92.562	273.378	13719
Superficie de intersección (km ²)	11,94	2,31	6,83	0,34

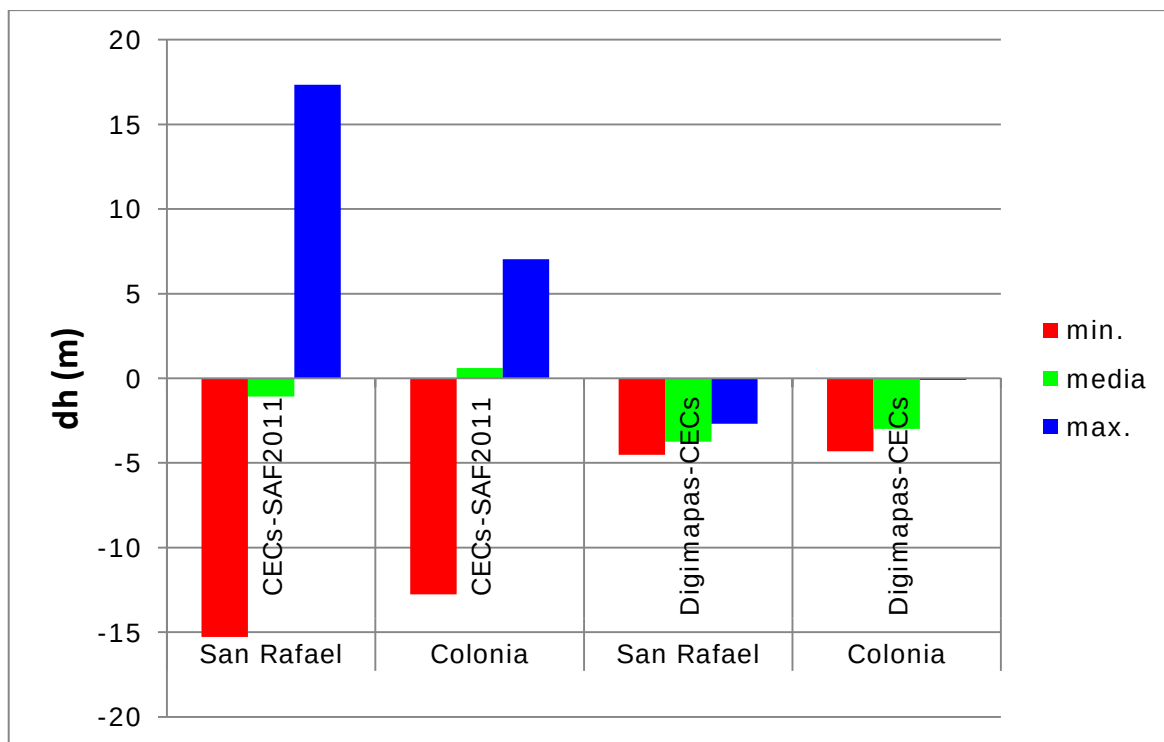


Figura 13.2-A. Resultados de la diferencia de altura (dh) obtenida en la comparación de los DEM LIDAR en el área de estudio.

Los valores encontrados en el resultado del cálculo de DH en el período 2011-2012 (Figs. 13.2-B y C), muestran una disminución de la cota superficial en promedio de $1,08 \pm 1,32$ m en el glaciar San Rafael y un aumento no significativo de $0,6 \pm 0,73$ m en el glaciar Colonia. Al realizar un análisis en detalle de la distribución espacial de los resultados (Fig. 13.2-D y E), se aprecia que los valores extremos se ubican en la zona inferior del área de estudio en ambos glaciares, donde la presencia de grietas explica este resultado.

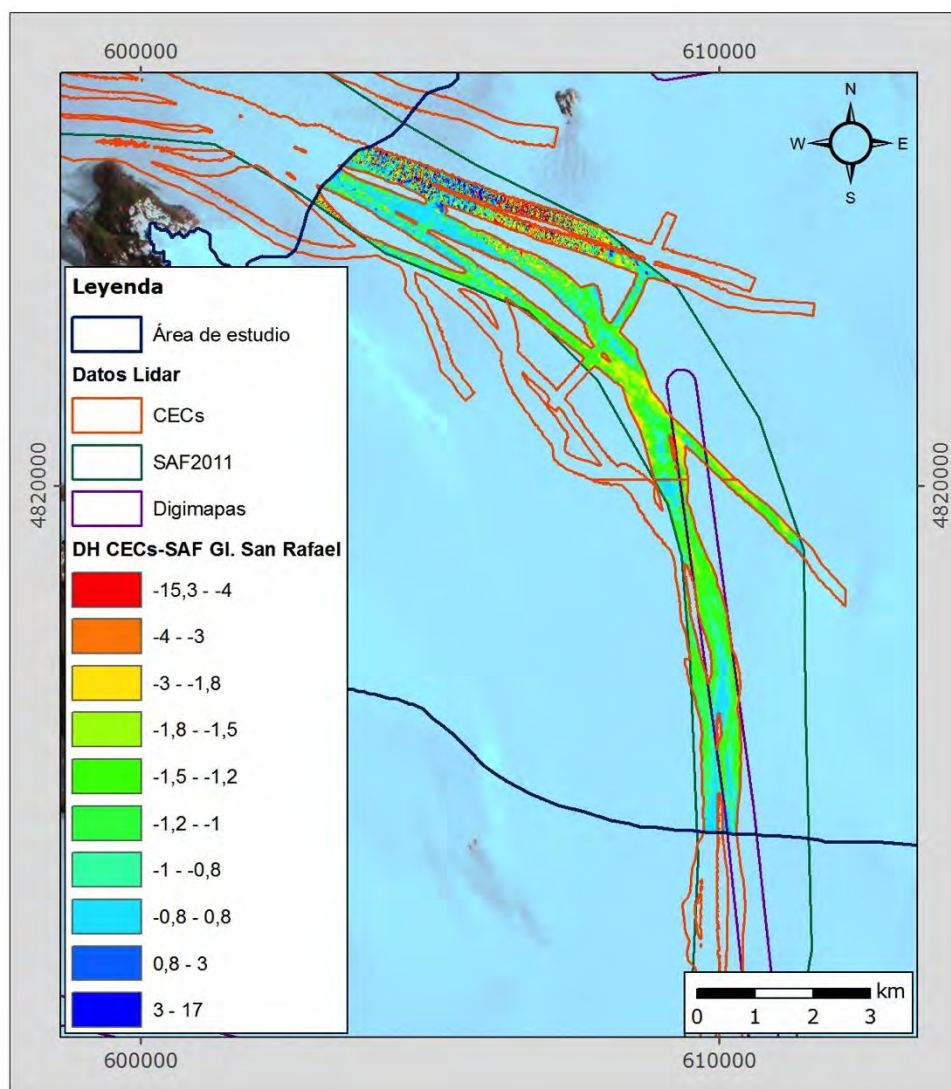


Figura 13.2-B. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM 2012 (CECs) y 2011 (SAF) en el glaciar San Rafael. Fondo imagen Landsat 8 del 18 de enero 2014, composición falso color bandas 6, 5, 4 resolución espacial de 30 m más banda pancromática con resolución de 15 m.

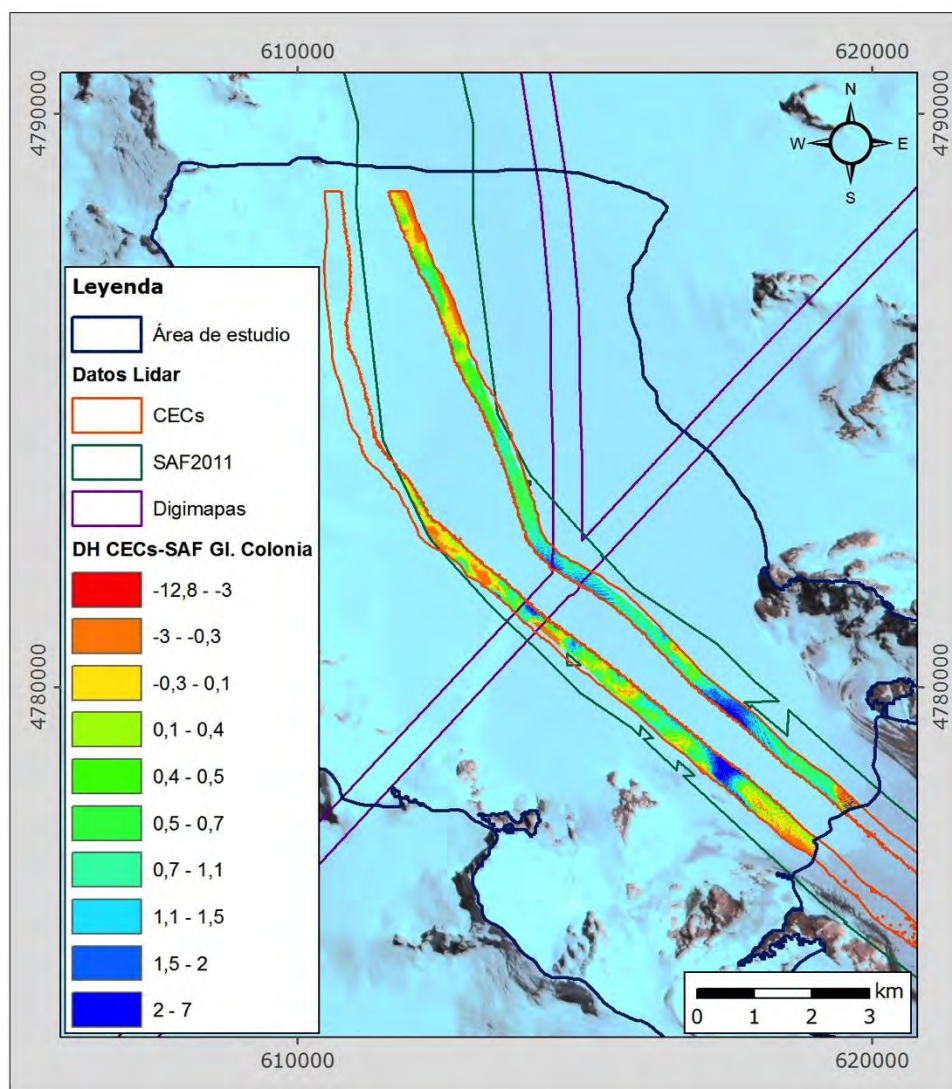


Figura 13.2-C. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM 2012 (CECs) y 2011 (SAF) en el glaciar Colonia. Fondo imagen Landsat 8 del 18 de enero 2014, composición falso color bandas 6, 5, 4 resolución espacial de 30 m más banda pancromática con resolución de 15 m.

El gráfico de dispersión de dh v/s elevación (Figura 13.2-D y E) confirma la ubicación de los valores extremos hacia la línea de equilibrio en ambos glaciares y también muestra que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango medio de $-1,08 \pm 1,32$ m en el glaciar San Rafael y $0,6 \pm 0,73$ m en el glaciar Colonia. 1,32 y 0,73 representan desviaciones estándar.

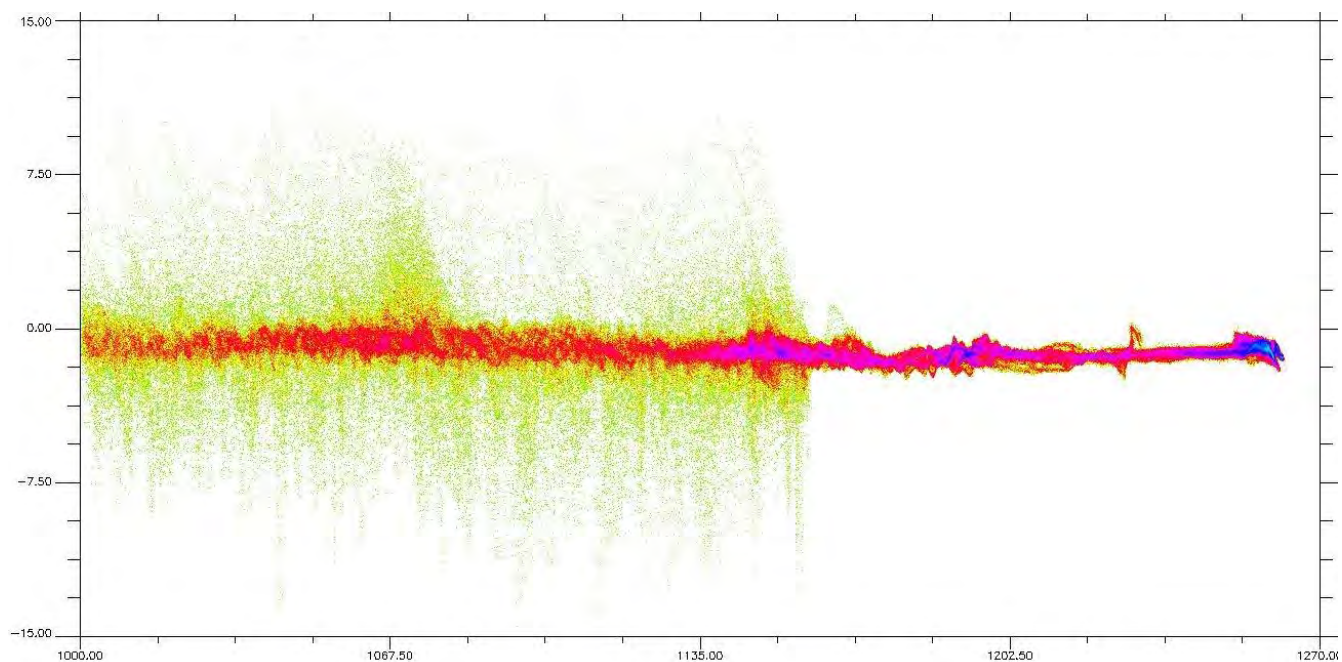


Figura 13.2-D. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar San Rafael.

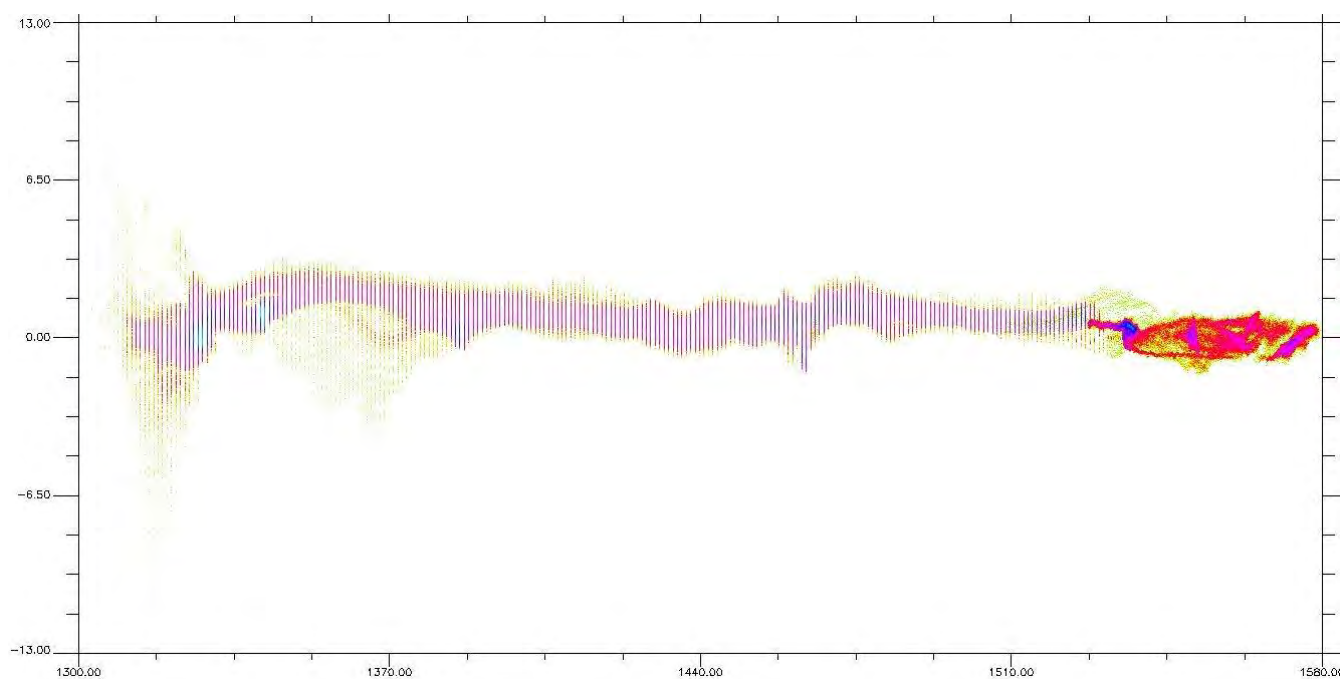


Figura 13.2-E. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar Colonia.

Otro hallazgo en el sector analizado del glaciar Colonia, es la presencia de artefactos dispuestos en bandas (Fig. 13.2-E), correspondientes al efecto de una resolución espacial degradada artificialmente que no es apropiada a la resolución espacial de la nube de puntos LIDAR.

Los valores de dh calculados en la intersección de las mediciones realizadas por Digimapas y por el CECs en el área de estudio de los glaciares San Rafael y Colonia (Fig. 13.2-F y G), son coherentes con la ventana de tiempo analizada, con una variación negativa promedio de $-3,74 \pm 0,28$ m en el glaciar San Rafael y de $-3,0 \pm 1,16$ m en el glaciar Colonia (Tabla 13.2-A), producto del derretimiento y transformación de la capa de nieve durante la primavera.

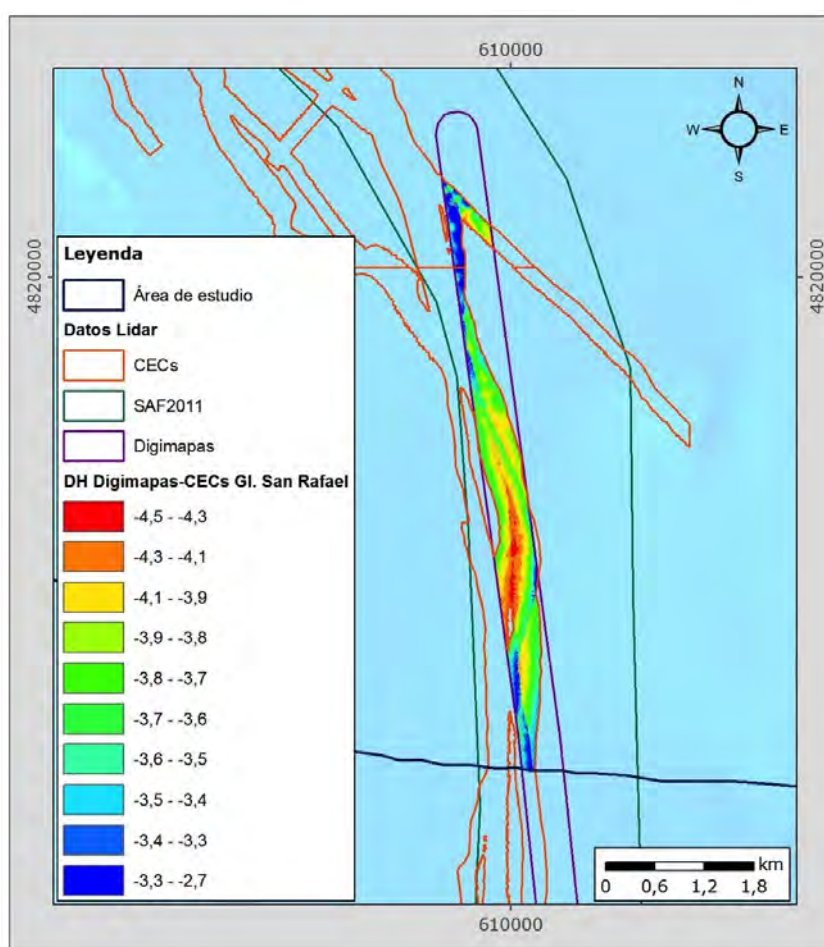


Figura 13.2-F. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM Digimapas y CECs en el glaciar San Rafael. Fondo imagen Landsat 8 del 18 de enero 2014, composición falso color bandas 6, 5, 4 resolución espacial de 30 m más banda pancromática con resolución de 15 m.

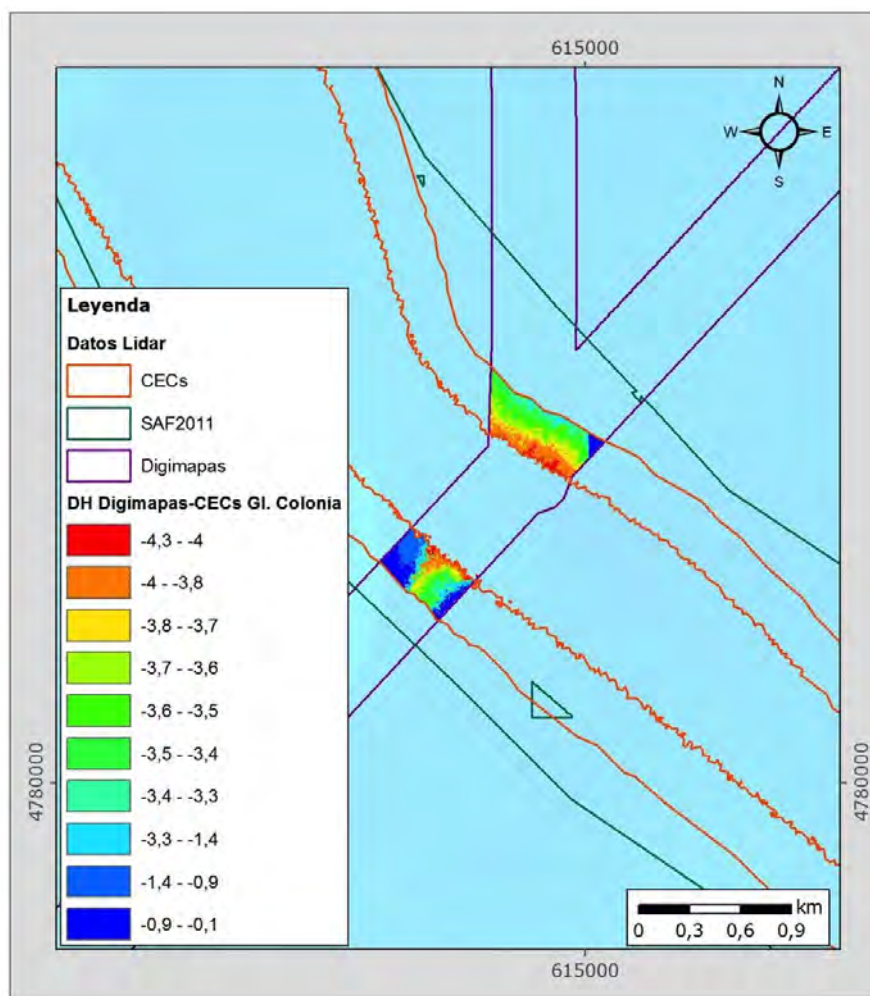


Figura 13.2-G. Diferencia de altura dh (m) obtenida en la comparación de los DEM Digimapas y CECs en el glaciar Colonia. Fondo imagen Landsat 8 del 18 de enero 2014, composición falso color bandas 6, 5, 4 resolución espacial de 30 m más banda pancromática con resolución de 15 m.

Otro aspecto relevante que se desprende del análisis es la distribución espacial de dh v/s elevación (Fig. 13.2-H e I), en donde se observan grupos de valores positivos y negativos de dh, producidos principalmente por artefactos no filtrados en la nube de puntos durante el procesamiento de los datos.

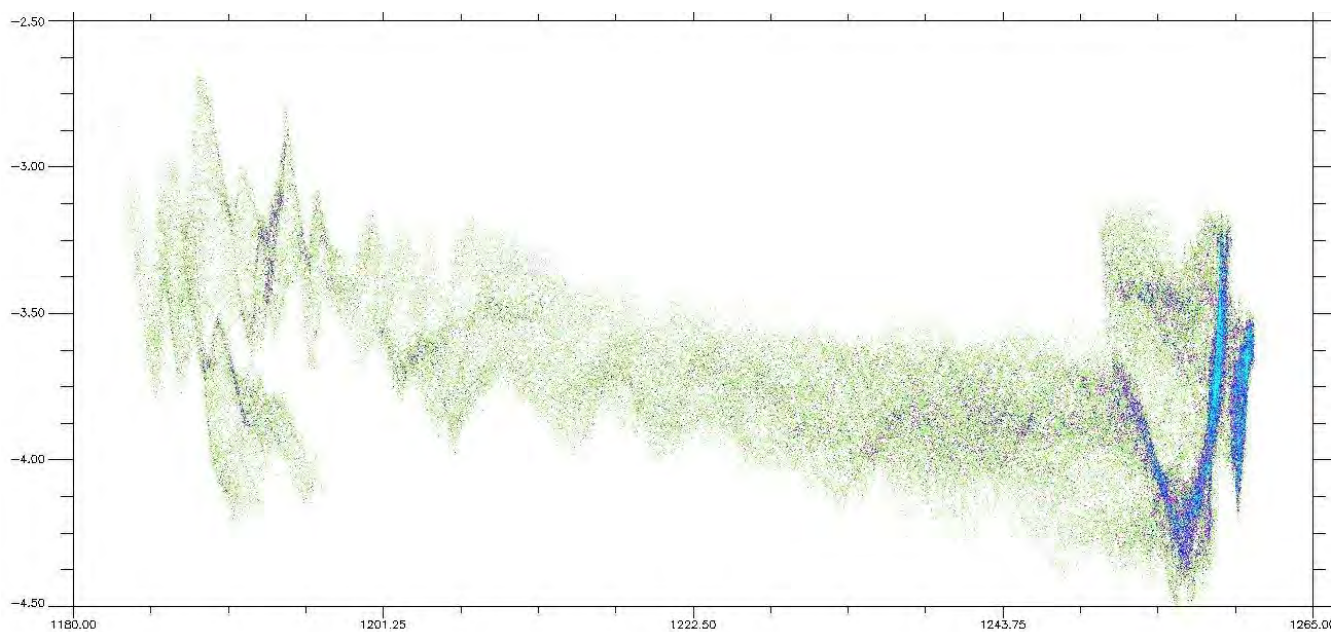


Figura 13.2-H. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar San Rafael.

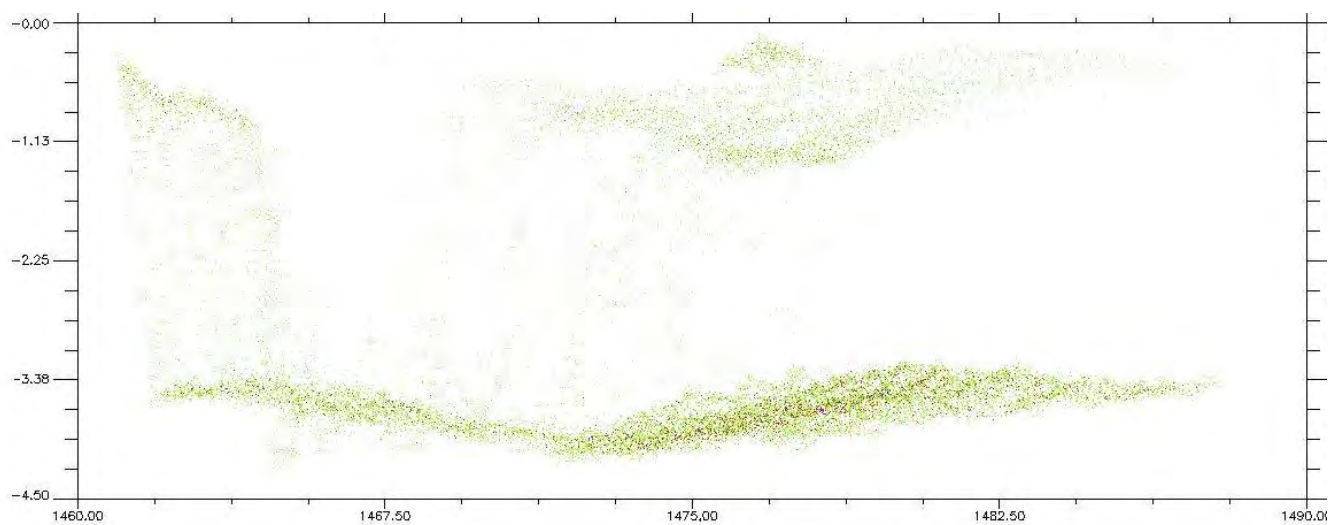


Figura 13.2-I. Gráfico de dispersión de dh (eje Y) v/s elevación (eje X) en la franja analizada del glaciar Colonia.

13.2.1. CAMBIOS DE ELEVACIÓN ENTRE DATOS GPS 2013 Y LIDAR 2012/2013

Se determinan en esta sección los cambios de elevación en la zona de acumulación de los glaciares San Rafael y Colonia, entre datos LIDAR de noviembre de 2012 y enero 2013, generados por la empresa Digimapas, que se comparan con datos DGPS cinemáticos efectuados mediante mototobogán durante el desarrollo de este estudio en el periodo del 23 de agosto al 3 de septiembre de 2013.

La Fig. 13.2.1-A muestra los sectores levantados mediante LIDAR en 2011, sobrepuestos a los recorridos GPS cinemáticos medidos durante este estudio en 2013. A partir del modelo digital de elevación (DEM según sus siglas en inglés) LIDAR de 2012/2013, disponible a una resolución espacial de 1 m, se interpolaron curvas de nivel a intervalos de 1 m, y se construyó una estructura TIN (Triangulated Irregular Network), mediante la cual se obtuvieron valores de elevación en cada una de las posiciones donde existían datos GPS terrestre de 2013. En total se obtuvieron 7.417 “cruces”, vale decir 7.417 posiciones donde existen datos LIDAR de 2011 y datos DGPS de 2013.

La Fig. 13.2.1-B ilustra las diferencias de altura entre los 7.417 datos DGPS de 2013 y los datos LIDAR de 2012/2013, que denominamos “dh”. El rango total de dh varía entre casi +6 m y poco menos de -4 m, con una gran mayoría (83.6%) del total de los cruces que corresponden a valores positivos de dh. Una inspección más detallada indica que el 81.7% del total de los datos corresponde a valores de dh positivos (es decir engrosamiento) entre 0 y 2.6 m. A pesar que no es estadísticamente significativo, tal como lo demuestra el coeficiente de correlación $R^2 = 0.1$ (ver Fig. 13.2.1-B), los datos sugieren una débil tendencia lineal al aumento de dh con la altitud. De acuerdo a la Fig. 13.2.1-B, los máximos valores de engrosamiento ocurren por lo general a una altura elipsoidal de 1450 m, en la divisoria de los glaciares San Quintín y Colonia, mientras que según la tendencia lineal dh tiende a valores cero hacia una altura elipsoidal de 1100 m, que corresponde aproximadamente a la altura de la línea de equilibrio (ELA según sus siglas en inglés) del glaciar San Rafael determinada por Barcaza *et al.*, 2009 (900 m s.n.m.) y Rivera *et al.*, 2007 (1013 m s.n.m.). La diferencia entre la altura elipsoidal WGS84 y la altura ortométrica (sobre el nivel medio del mar) es en esta zona del orden de 20 m de acuerdo al modelo geoidal EGM96 (Tabla 5.2.1-B).

En cuanto a errores, la precisión de las alturas DGPS de 2013 es del orden de 10 cm (sección 5.2), mientras que la precisión de las alturas LIDAR de 2012/2013 es del orden de 20 cm, resultando en un error de cuadratura (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores de las dos alturas) de 22 cm. En base a este error, podemos considerar entonces que la diferencia de altura de la superficie del glaciar medida entre 2013 y 2012/2013 es real, y representa un engrosamiento promedio de 0.8 ± 0.2 m, con una desviación estándar de 1,3 m para la población de 7.417 datos.

La Fig. 13.2.1-C ilustra la variación espacial de las diferencias de altura dh entre 2013 y 2012/2013. Se aprecia en esta figura los valores máximos cercanos a +2.6 m en la divisoria de los glaciares San Quintín y Colonia, unos 5 km al norte del Pozo 2, y por lo general los valores mínimos cercanos a cero unos 3 km al sur del Pozo 1, cerca de la línea de equilibrio como se indicó antes. Aparacen sin embargo adelgazamientos locales de hasta 4 m en el sector de las transectas transversales T001 y T004. Considerando las altas tasas de acumulación anual en la zona, que pueden alcanzar fácilmente 5 m de altura de nieve por año, se puede concluir que tanto los engrosamientos (de hasta 6 m) y adelgazamientos (de hasta 4 m) medidos en el periodo 2013-2011 corresponden probablemente a variaciones locales de diferencia de acumulación y no representan una tendencia de mediano o largo plazo.

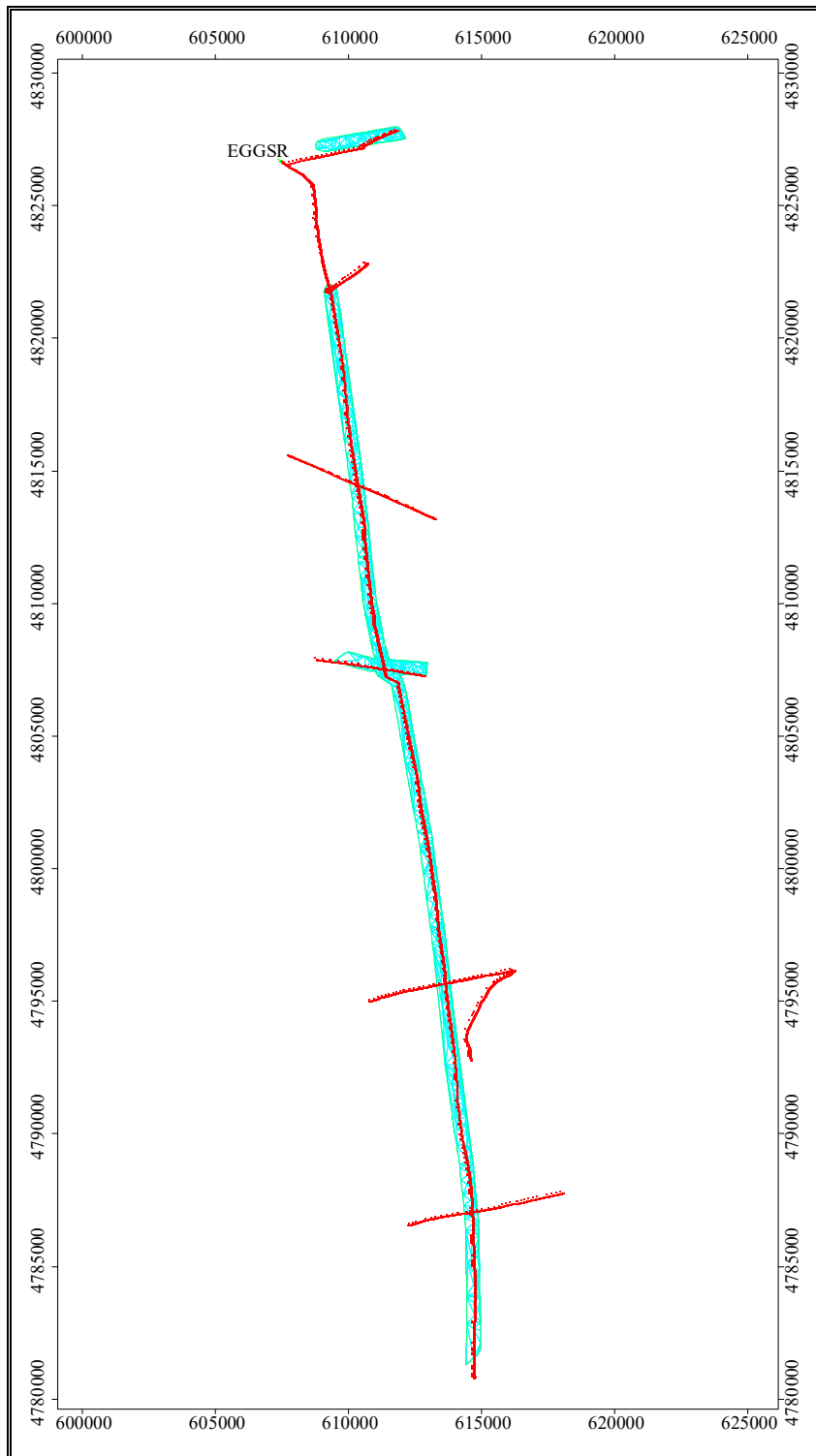


Figura 13.2.1-A. Sectores levantados mediante LIDAR por la empresa Digimapas en 2012/2013, sobrepuestos a los recorridos GPS cinemáticos medidos durante este estudio en el periodo 23 de agosto al 3 de septiembre de 2013.

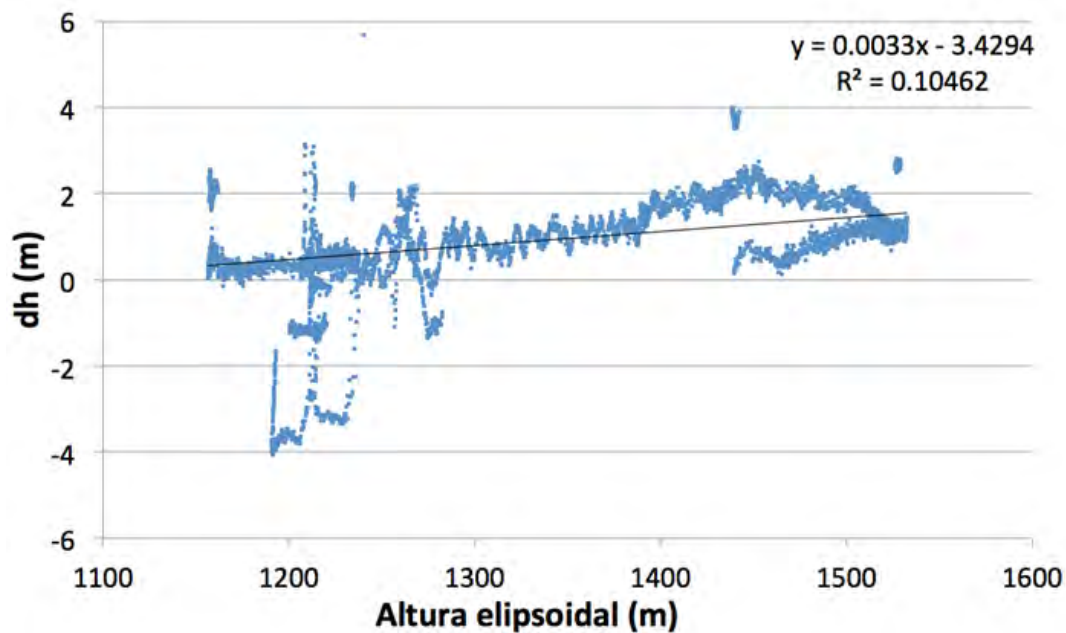


Figura 13.2.1-B. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2013 y los datos LIDAR de 2012/2013. Valores positivos representan engrosamiento y valores negativos indican adelgazamiento. La altura elipsoidal corresponde a 2012/2013 y está referida al sistema geodésico WGS84.

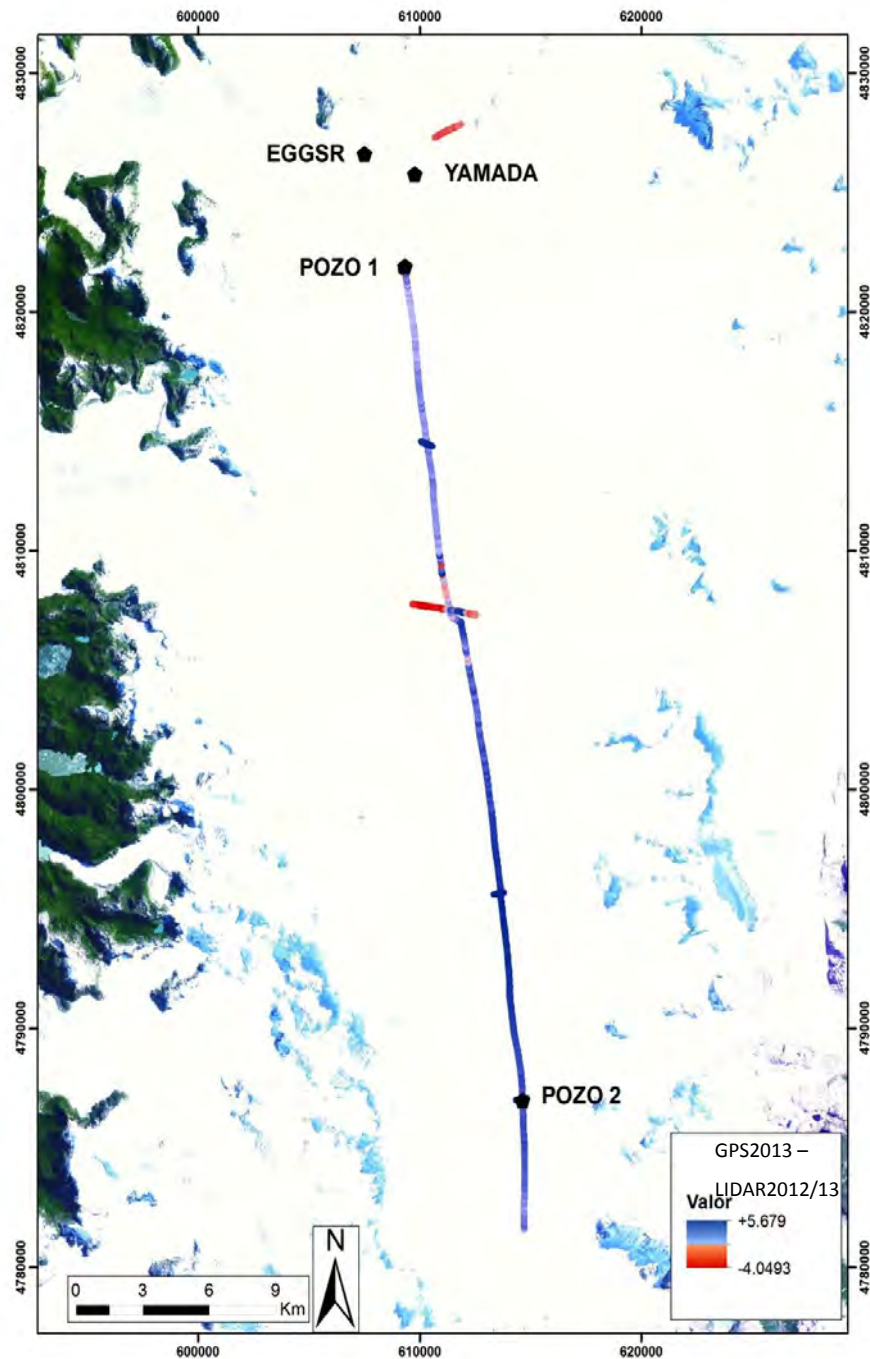


Figura 13.2.1-C. Diferencia de altura (dh) entre los datos DGPS de 2013 y los datos LIDAR Digimaps de 2012/2013. Los valores en rojo corresponden a adelgazamiento, mientras que los valores en azul corresponden a engrosamiento.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Barcaza, G., Aniya, M., Matsumoto, T., & Aoki, T. 2009. Satellite-derived equilibrium lines in Northern Patagonia Icefield, Chile, and their implications to glacier variations. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41, 174–182.
- Bogorodsky, V., Bentley, C. & Gudmandsen, P. 1985. *Radioglaciology*. D. Reidel Publishing Company, 1st Ed., 254 pp.
- Bolton, D. 1980. The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1046-1053.
- British Antarctic Survey (BAS). 2003. *Field Operations Manual*, First Edition, December 2003. BAS, Natural Environment Research Council, 193 p.
- Brock, B.W. & Arnold, N.S. 2000. A spreadsheet-based (Microsoft Excel) point surface energy balance model for glacier and snow melt studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(6), 649-658.
- Campbell Scientific Inc. 2007. *SR50A Instruction Manual*.
- Casassa, G., Damm, V., Eisenburger, D., Jenett, M., Cárdenas, C., Acuña, C., Rivera, A. & Lange, H. 2001. Estudios glaciológicos en Patagonia y Chile central utilizando un sistema aerotransportado de radio eco sondaje. *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 29, 25-44.
- Cuffey K.M. & Paterson, W.S.B. 2010. *The physics of glaciers*. Fourth Edition.
- Daniels, D.J. 2004. *Ground Penetrating Radar*. Institution of Electrical Engineers, ISBN 978-0-86341-360-5, 2nd Ed., 726 p.
- DGA. 2008. *Manual de Nieve y Nivometría. Volumen N°1. Apuntes de clases*. SIT N°0167. Diciembre 2008.
- DGA. 2009. *Estrategia Nacional de Glaciares*. SIT N° 205.
- DGA. 2012. *Variaciones recientes de glaciares en respuesta al cambio climático: características glaciológicas de los glaciares San Rafael, Nef y Colonia, Campo de Hielo Norte*. Informe Final. Realizado por Centro de Estudios Científicos. S.I.T. N° 302.
- DGA. 2013. *Bases Administrativas y Técnicas de la Prestación de Servicios Personales denominada "Caracterización física del manto nival en Campo de Hielo Norte en base a mediciones GPR terrestre"*. Resolución D.G.A. (exenta) N° 1224, 18 abril 2013, 34 pp.
- Escobar, F., Vidal, F., Garin, C. & Naruse, R. 1992. Water balance in the Patagonia icefields. In R. Naruse, & M. Aniya (Eds.), *Glacier Researches in Patagonia*, 1990,

- 109–119. Sapporo.
- Fierro, J., Castillo, M. & Valenzuela, C. 2003. Propagacion de la onda de marea en canales adyacentes a Campos de Hielo Sur. *Cienc. Tecnol. Mar*, 26 (1), 5-14.
- Francou, B. & Pouyaud, B. 2004. Método de observación de glaciares en los Andes tropicales: mediciones de terreno y procesamiento de datos. Informe IRD GREAT ICE: 250 p.
- Fujiyoshi, Y., Kondo, H., Inoue, J. & Yamada, T. 1987. Characteristics of precipitation and vertical structure of air temperature in the northern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 4, 15-23.
- Fukami, H. & Naruse, R. 1987. Ablation of ice and heat balance on Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research* 4, 37-42.
- Hock, R. 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *J. Hydrol.*, 282(1–4), 104–115.
- Kovacs, A., Gow, A.J. & Morey, R.M. 1995. The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Regions Science and Technology*, 23, 245-256.
- Koppes, M., Conway, H., Rasmussen L.A. & Chernos, M. 2011. Deriving mass balance and calving variations from reanalysis data and sparse observations, Glaciar San Rafael, northern Patagonia, 1950–2005, *The Cryosphere*, 5, 791–808.
- Maas, H.-G., Casassa, G., Schneider, D., Schwalbe, E. & Wendt, A. 2013. Photogrammetric techniques for the determination of spatio-temporal velocity fields at Glaciar San Rafael, Chile. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 79(3), 299-306.
- Matsuoka, K., & Naruse, R. 1999. Mass balance features derived from a firn core at Hielo Patagonico Norte, South America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 31, 333–340.
- Nobes, D.C. 2011. Ground penetrating radar measurements over glaciers. In *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*, Eds. V.P. Singh, P. Singh and U.K. Haritashya, Springer, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Dodrecht, The Netherlands, 490-503.
- Oerlemans, J. 2010. *The Microclimate of Valley Glaciers*. Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrech. 138 pp.
- Ohata, T., Enomoto, H. & Kondo, H. 1985. Characteristics of ablation at San Rafael Glacier. *Glaciological Studies in Patagonia, Northern Icefield, 1983–1984*. Data Center for Glacier Res., JSSI, 37–45.
- Plewes, L.A. & Hubbard, B. 2001. A review of the use of radio-echo sounding in

- glaciology. *Progr. Phys. Geogr.*, 25(2), 203–236.
- Rasmussen, L.A. 2009. South Cascade Glacier mass balance, 1935-2006. *Annals of Glaciology*, 50, 215-220.
- Rivera, A., Benham, T., Casassa, G., Bamber, J. & Dowdeswell, J. 2007. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. *Global and Planetary Change*, 59, 126-137.
- Protocolo al Tratado Antártico Sobre Protección del Medio Ambiente (Protocolo de Madrid). Madrid, 4 de octubre de 1991.
http://www.ats.aq/documents/recatt/Att006_s.pdf.
- Sandmeier, K. 2004. *Reflexw manual ver. 3.5*. Karlsruhe, 377 pp.
- Shaefer, M., Machguth H., Falvey, M. & Cassasa, G. 2013. Modeling past and future surface mass balance of the Northern Patagonia Icefield. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, 1–18.
- Silva, N. & Palma, S. (eds.). 2006. *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a Cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional, 161 pp.
- Yamada, T. 1987. Glaciological characteristics revealed by 37.6-m deep core drilled at the accumulation area of San Rafael Glacier, the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, 59–67.

ANEXO 1. 1ª CAMPAÑA (2013) A LA MESETA CHPN

ANEXO 1.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 1ª CAMPAÑA (2013) A LA MESETA CHPN

Día 0. Martes 6 de agosto 2013. Inicio de la campaña

Envío de equipos y materiales vía terrestre y aérea a Puerto Aysén.

Día 1. Miércoles 7 de agosto 2013.

Traslado terrestre de Rodrigo Traub (RT) en vehículo particular desde Santiago a Temuco.

Día 2. Jueves 8 de agosto 2013.

RT retira equipos en Temuco.

Día 3. Viernes 9 de agosto 2013. Primer traslado a Puerto Aysén.

Traslado aéreo de Rodrigo Vivanco (RV) y Alberto Peralta (AP) desde Santiago a Balmaceda, y luego traslado terrestre desde Balmaceda a Puerto Aysén. Reconocimiento de la Lancha Motor (L/M) Danubio Azul, matrícula CHB 1980, CB 7820 en "Aguas Muertas". Alojamiento de RV y AP en Cabañas Queitao en Puerto Aysén. RT se traslada en vehículo particular hacia el paso Cardenal Samoré y cruza la frontera hacia Argentina.

Día 4. Sábado 10 de agosto 2013. Segundo traslado a Puerto Aysén.

Traslado aéreo de Marcelo Arévalo (MA) a Balmaceda, reunión de coordinación con Rodrigo Espinoza, piloto de helicopters.cl. Reunión en Balmaceda con RT, viaje terrestre hasta Puerto Aysén para reunirse con RV y AP. Alojamiento del grupo en Cabañas Queitao en Puerto Aysén.

Día 5. Domingo 11 de agosto 2013. Carga de L/M Danubio Azul.

Carga de equipos y alojamiento a bordo de la Lancha Motor Danubio Azul.

Día 6. Lunes 12 de agosto 2013. Zarpe desde Puerto Aysén.

Zarpe de la L/M Danubio Azul desde Puerto Aysén a las 04:00 h. Capitán Alejandro Núñez, motorista Manuel Martínez, marineros José Marín y Carlos Ruiz. Navegación por el canal Aysén, luego el canal Costa y canal Elefantes, y parada en Puerto Bonito desde las

13:00 hasta las 18:00 para evitar navegar contra la corriente. Recalada para en Puerto Toni para esperar el alba.

Día 7. Martes 13 de agosto 2013. Navegación hasta Laguna San Rafael (LSR).

Zarpe al alba, a las 8:30 h navegación por el Fiordo Elefantes. A las 10:30 h llegada al muelle de Laguna San Rafael (LSR). Descarga de los equipos pequeños y 13 tambores de combustible de 200 l para helicóptero al muelle. Las 3 motos (1 cuadrimoto y 2 motos de nieve) y el carro fueron descargados a la playa en un bote auxiliar (panga) de la L/M Danubio Azul. Por la noche traslado de parte de los equipos a la pista aérea (SCRF) mediante el carro y la cuadrimoto. En LSR los guardaparques Gustavo Rodríguez y Alejandro Segura reciben al grupo. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 8. Miércoles 14 de agosto 2013. Preparación de equipos en LSR.

Lluvia y chubascos. Preparación de alimentos y equipos. Transporte de tambores de combustible desde el muelle a la pista aérea. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 9. Jueves 15 de agosto 2013. Preparación de equipos en LSR.

Intensos chubascos. Preparación de cámaras secuenciales y equipos en general. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 10. Viernes 16 de agosto 2013. Instalación de las cámaras fotográficas en LSR.

Nublado y chubascos aislados. Relevo de los guardaparques de CONAF en un viaje del catamarán Chaitén. Llegan los guardaparques Francisco y Pablo y el ayudante Pablo de CONAF. Instalación de las cámaras fotográficas en la ladera norte cerca del frente del glaciar San Rafael. Cámara 1: AB 3863, coordenadas 588.945 E, 4.829.888 N, 170 m s.n.m., Canon Rebel XS-EOS N. 3540600807, lente Canon 58 mm 1:3.5-5.6, EF-S 18-55. Cámara 2: AB 3865, coordenadas 589.131 E, 4.829.719 N, 180 m s.n.m., Canon Rebel XS-EOS N. 3640633947, lente Canon 58 mm 1:3.5-5.6, EF-S 18-55. Las cámaras son parte del sistema de fotografía secuencial Harbotronics, con caja exterior fijada al tubo vertical de un trípode corto, fabricado en tubo de aluminio de 32 mm x 3 mm, anclado a la roca mediante placas de acero galvanizado con pernos de expansión de 5/16" x 2". La altura de las cámaras sobre el terreno es de 80 cm. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 11. Sábado 17 de agosto 2013. Espera en LSR.

Lluvia durante todo el día. Estadía en la cabaña de CONAF en LSR.

Día 12. Domingo 18 de agosto 2013. Preparación de equipos en LSR.

Lluvia por la mañana, amainando por la tarde y lluvia nuevamente por la noche. Al mediodía preparación de equipos en la pista aérea. Armado de una carpa al costado de la pista aérea, almacenando equipos que no serán utilizados en el glaciar San Rafael. Visita a la estación meteorológica DGA de la LSR. La reja perimetral está sin candado, la caja donde está alojado el datalogger se encuentra con candado. Mantenimiento del pluviómetro (limpieza), evidente obstrucción del embudo. Visita a la estación de nivel de agua DGA en LSR, coordenadas 18G 586.243 E, 4.834.447 S, marca Stevens, hora instrumento 17:02:10, hora local con navegador GPS 17:11:10, fecha:08/18/13, intervalo 01:00:00, 13.9 V, conexión serial 9 pines, 171138N. El sensor se encuentra instalado en el extremo del muelle dentro de un tubo PVC hidráulico, dentro de una caja plástica Pelikan están el datalogger y la batería (sin fijación), presencia visible de humedad interior. La caja Pelikan esta fijada al piso del muelle con dos vueltas de alambre. Se sugiere fijación para la caja Pelikan y fijación para el cable del sensor. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 13. Lunes 19 de agosto 2013. Espera en LSR.

Chubascos de agua-nieve y nieve. Preparación de equipos en LSR. Revisión de las cámaras secuenciales del frente del glaciar San Rafael. La cámara 1 no muestra los datos de día y hora de disparo. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 14. Martes 20 de agosto 2013. Espera en LSR.

Chubascos de agua-nieve y nieve. Preparación de equipos en LSR. Alojamiento en cabaña de CONAF, LSR.

Día 15. Miércoles 21 de agosto 2013. Arribo del helicóptero a LSR.

Despejado, frío. Preparación de equipos en LSR. Se retira la cámara 1, se deja en el lugar del trípode las abrazaderas y panel solar. La cámara será entregada a Rodrigo Espinoza (piloto del helicóptero) para que la lleve a Coyhaique. A las 13:30 h arriba a la pista aérea de LSR el helicóptero Ecureuil AS350-B2 de helicopters.cl. Piloto Rodrigo Espinoza, mecánico Sebastián Saavedra. Alojamiento de todo el grupo en cabaña de CONAF, LSR.

Día 16. Jueves 22 de agosto 2013. Ingreso a EGGSR.

A las 11:45 comienza el primero de 7 vuelos desde Laguna San Rafael a la Estación Glaciológica Glaciar San Rafael (EGGSR), Campo de Hielo Patagónico Norte, ubicada a cota 1200 m s.n.m., cerca de la línea de equilibrio del glaciar San Rafael.

Vuelo 1, 11:43→12:04 h, 2 pasajeros con equipos completos, alimentos, generador, combustible. Vuelo 2, carga colgante 500 kg, alimentos, cocina y combustibles.

12:48 h reabastecimiento de combustible en Laguna San Rafael.

Vuelo 3, carga colgante 410 kg, combustibles.

Vuelo 4, carga colgante 500 kg, moto de nieve negra WT.

14:03 h reabastecimiento de combustible.

Vuelo 5, carga colgante 400 kg, trineos y carga general.

Vuelo 6, carga colgante 530 kg, moto de nieve amarilla SWT.

15:27 h reabastecimiento de combustible.

Vuelo 7, 3 pasajeros.

El helicóptero regresa en la tarde a Coyhaique.

Total 6.2 horas de vuelo los días 21 y 22 de agosto, 2.9 h transporte de pasajeros y 3.3 h transporte de carga. Habilitación de los 2 módulos de la EGGSR, depeje de nieve y hielo desde el interior. El Módulo Sur se destina a cocina y camarote de 2 pasajeros (MA y RT), el Módulo Norte para dormitorio y sala de trabajo de 3 pasajeros (CP, AP y RV). Búsqueda infructuosa debajo de 1 m de nieve del pin que monumenta la base DGPS. Preparación de depósito externo para combustible y equipos.

Día 17. Viernes 23 de agosto 2013. Perfil longitudinal.

Despejado, -19°C por la mañana, sin viento. Aprovechando las excelentes condiciones meteorológicas se preparan los equipos de radar, se encuerdan las motos, se instala una base DGPS en roca a unos 60 m del refugio EGGSR a unos 5 metros al sur de la torre de la estación meteorológica automática (AWS). Salida de EGGSR a las 13:00 h. En el cruce con la transecta C-C' (Fig. 1-A), donde se planea instalar la torre nivométrica 1, queda AP cavando un pozo estratigráfico para medición de densidad, temperatura, granulometría y estratigrafía. MA, CP y RV continúan midiendo con las motos y con el radar el perfil longitudinal hasta su extremo sur (cruce G-G' en la Fig. 1-A), terminando a las 18:30 h e iniciando el regreso. Se recoge a AP al regreso, el Pozo 1 está avanzado hasta los 300 cm de profundidad. Regreso a la EGGSR a las 20:00 h.

Día 18. Sábado 24 de agosto 2013. Perfil longitudinal.

Despejado, nubes cirrus altas por la tarde, viento calma, temperatura -3°C por la mañana. Traslado en motos de nieve al perfil longitudinal. AP y RV continúan la excavación y mediciones del Pozo 1, y luego se trasladan al sursureste realizando mediciones de densidad con taladro Monte Rosa (100 cm superficiales) cada 5 km, en cada baliza, hasta el extremo sur del perfil (cruce G-G', Fig. 1-A). MA y AP se desplazan hasta el extremo sur para regresar midiendo con DGPS balizas instaladas en cada cruce. Se finalizan las mediciones en el Pozo 1, 6 balizas medidas con DGPS en modo estático y Monte Rosa en nueve puntos.

Día 19. Domingo 25 de agosto 2013. Armado de Torre 1 en EGGSR.

Buen tiempo, nublado cirrus, temperatura -5°C por la mañana, aumentando a -0.9°C por la tarde, empieza el viento cálido y húmedo del NE. Armado de Torre 1 en EGGSR. Por facilidades logísticas se prefiere armar las 2 torres en el refugio EGGSR, y trasladarlas a los sitios respectivos en trineos. Perforación del Pozo 1 con el taladro Kovacs desde los 4 m (fondo del pozo) hasta los 8 m. Se almacenan muestras de 20 cm de largo en bolsas plásticas que luego se enviarán a laboratorio para análisis.

Día 20. Lunes 26 de agosto 2013. Preparación de la Torre 2 en EGGSR.

Ventisca, viento y nieve del NE, temperatura -2°C aumentando a -1°C . Preparación de la Torre 2 en EGGSR. Sin actividades exteriores por mal tiempo.

Día 21. Martes 27 de agosto 2013. Armado de la Torre 2 en EGGSR.

Viento 8-10 km/h del N rotando al NW, temperatura -5°C . Termina el armado de la Torre 2 en EGGSR.

Día 22. Miércoles 28 de agosto 2013. Estadía en EGGSR.

-0.5°C por la mañana. Lluvia al mediodía, nieve por la tarde. Estadía en EGGSR. Sin actividades exteriores por mal tiempo.

Día 23. Jueves 29 de agosto 2013. Instalación de la Torre 1.

Buen tiempo, temperatura $+3^{\circ}\text{C}$ y aumentando, viento calma, superficie con nieve fresca muy blanda/pesada. Instalación de la Torre 1, antes hay que desenterrar la torre que está bajo 60 cm de nieve fresca. Se limpia el pozo para continuar hasta los 13 m con el taladro Kovacs. Muestreo de los testigos cada 20 cm. Al anochecer comienza una lluvia intensa. En la torre se instalan termistores, batería, placa metálica abajo. Se levanta la

torre enterrando la base en el lugar de perforación y se tapa el pozo con nieve hasta la superficie.

Día 24. Viernes 30 de agosto 2013. Mal tiempo en EGGSR.

Viernes nublado, chubascos leve de nieve y agua nieve. Noche anterior intensa nevada. Preparación del tubo del sensor de altura de la Torre 2. Sin actividades exteriores por mal tiempo.

Día 25. Sábado 31 de agosto 2013. Mal tiempo en EGGSR.

Chubascos de agua nieve por la mañana, lluvia por la noche, viento norte. Intensa nevada nocturna con arrastre de nieve. Sin actividades exteriores por mal tiempo.

Día 26. Domingo 1 de septiembre 2013. Mal tiempo en EGGSR.

A la espera de buen tiempo en EGGSR. Sin actividades exteriores por mal tiempo.

Día 27. Lunes 2 de septiembre 2013. Traslado de Torre 2, Pozo 2 y mediciones GPR.

Instalación de sensores meteorológicos en la Torre 1 por parte de CP y RV; fijación del brazo de soporte con sensor de altura y termistores; instalación de la caja con el datalogger Campbell CR800 en la parte baja de la torre; conexiones de los instrumentos al datalogger. Luego CP y RV realizan transectas transversales C-C' y D-D' con el GPR y se dirigen al sitio de la Torre 2 (A', Fig. 1-A), ubicado en la zona de acumulación del glaciar Colonia. Traslado de la estructura de la Torre 2 por MA & AP mediante una moto y trineos. Excavación del pozo estratigráfico en el sitio Torre 2 hasta 2 m de profundidad con muestreo cada 20 cm. Regreso a EGGSR.

Día 28. Martes 3 de septiembre 2013. Instalación de Torre 2, Pozo 2 y mediciones GPR.

Traslado en motos de nieve a sitio Torre 2. Medición (MA, CP) de transectas GPR transversales B-B', E-E', F-F', G-G' en el camino. Se continúa excavando (RV, CP) el Pozo 2 hasta los 4 metros de profundidad, con toma de muestras de nieve/neviza cada 20 cm. Luego perforación con taladro Kovacs hasta los 6.4 m con toma de muestras. No se continúa la toma de muestras pues se atasca el taladro y es preciso desenterrarlo con pala. Se continúa con la perforación hasta los 8 m para la instalación del tubo base de la Torre 2, la placa de unión del tubo de 2" y la sección triangular queda a una profundidad

de 2 m. Instalación en Torre 2 de sensores de temperatura, reflectores RECCO en la punta del tubo y reflectores nocturnos en los costados de la torre. Regreso a EGGSR. Después de la cena CP realiza una revisión del estado y calidad de los datos GPS y radar (GPR), todo bien, se da por terminado el trabajo con GPR y DGPS cinemático.

Día 29. Miércoles 4 de septiembre 2013. Intento de viaje a Torre 2.

Se preparan las dos motos de nieve y un trineo para llegar hasta la Torre 2 con la intención de levantarla. Al momento de la salida (09:30 h) se inicia una intensa lluvia que a medida que se avanza hacia el Sur se va transformando en agua nieve y luego en copiosa nieve que impide una visión clara. Al llegar a la Torre 1 se abandona el intento y se regresa a EGGSR. Por la tarde se mantiene e intensifica la lluvia.

Día 30. Jueves 5 de septiembre 2013. Espera en EGGSR.

Continúa la lluvia que no cesa desde ayer, temperatura +5°C, viento 20 km/h, neva por la tarde, declina el viento y aumenta la nevada con grandes copos. Sin actividades exteriores por mal tiempo.

Día 31. Viernes 6 de septiembre 2013. Instalación de Torre 2 y término de los trabajos.

Frío y despejado desde la madrugada, viaje rápido y directo hasta la Torre 2, al regreso parada breve en Torre 1 con revisión de los datos. La estructura de la Torre 2 está enterrada bajo 70 cm de nieve. Es preciso desenterrarla, recavar el pozo y descongelar las piezas. Se instala una lámina de acero de 1x1 m horizontalmente en el pozo a una profundidad de 2 m para detección futura mediante GPR. Luego se levanta y se inserta la estructura sobre la placa triangular de acero fijada mediante pernos. Se cubre el pozo hasta la superficie. Se instala la caja con el datalogger y luego la batería. Se conectan los sensores. Regreso a EGGSR con nevada y viento norte.

Día 32. Sábado 7 de septiembre 2013. Espera para evacuación en EGGSR.

Lluvia.

Día 33. Domingo 8 de septiembre 2013. Espera para evacuación en EGGSR.

Lluvia.

Día 34. Lunes 9 de septiembre 2013. Espera para evacuación en EGGSR.

Lluvia, nieve por la tarde. Preparación del plan de evacuación.

Día 35. Martes 10 de septiembre 2013. Espera para evacuación en EGGSR.

Chubascos de agua lluvia.

Día 36. Miércoles 11 de septiembre 2013. Espera para evacuación en EGGSR.

Traslado y acumulación de equipos en depósito contiguo al refugio, preparación de la carga. Excursión pedestre de AP, CP y RV hasta la Torre 1, instalación de los reflectores Recco. Se bajan datos de la AWS EGGSR.

Día 37. Jueves 12 de septiembre 2013. Evacuación hacia LSR.

Buen tiempo, -5°C a 07:00 h, viento SE 6 km/h. Llegada del helicóptero a EGGSR a las 11:30 h.

Viaje 1: Sube Gabriela Collao (GCB), bajan RV, RT y CP. RV se encarga en LSR de la distribución de cargas y conduce la cuádrimotocicleta. RT se encarga de comidas y del refugio CONAF. CP baja los datos desde la estación AWS Vaisala cercana al muelle.

Viaje 2: Carga colgante con moto de nieve SWT amarilla con 4 estanques vacíos de combustible, bidón baño, tubos de plástico y tubos de aluminio.

Viaje 3: Carga colgante, equipos en general.

Viaje 4: Carga colgante con moto de nieve WT negra.

Viaje 5: Carga colgante, equipos en general.

Viaje 6: 3 pasajeros (GCB, AP, MA) con equipo personal.

Total 5.7 horas de vuelo.

La carga general fue depositada en la entrada del muelle, las motos de nieve fueron depositadas en el extremo del muelle hacia la LSR. A las 17:20 h regreso del helicóptero a Coyhaique con CP a bordo y las muestras de nieve/neviza. Alojamiento en cabaña de CONAF. Preparación del sistema de Cámara fotográfica 1.

Día 38. Viernes 13 de septiembre 2013. Instalación Cámara 1 en LSR.

GCB y MA salen temprano a instalar la Cámara 1 en el costado del glaciar San Rafael. Se bajan los datos de la Cámara 2, regreso al refugio CONAF. La barcaza está atrasada por problemas durante la navegación. Alojamiento en cabaña CONAF.

Día 39. Sábado 14 de septiembre 2013. Zarpe de LSR en Barcaza Doña Lía.

Se regresa a la Cámara 2 pues se detecta que los datos obtenidos solo alcanzan hasta el

30 de agosto. Efectivamente se comprueba que el temporizador automático Digisnap no funciona. Se procede a apagar y encender el Digisnap, con lo cual comienza a funcionar correctamente. Se verifica el funcionamiento de la Cámara 1 instalada ayer. A las 13:00 h recalca la Barcaza Doña Lía en el muelle de LSR. Se carga la barcaza, zarpe a las 15:15 h. Recalada nocturna en Puerto Bonito a las 23:30 h.

Día 40. Domingo 15 de septiembre 2013. Retorno a Puerto Aysén.

A las 5:45 h se levanta el ancla y se zarpa desde Puerto Bonito, Canal Elefantes. Llegada a Aguas Muertas a las 18:00 h con marea baja. Los camiones (camión de la empresa Don Raúl que transportará los equipos a Santiago, camión de helicopters.cl que recoge equipos y tambores de combustible dejados en LSR y camioneta de la CONAF que retira equipos menores) están esperando la llegada de la barcaza. Con marea baja la maniobra es complicada pues es demasiado corto el brazo de la grúa de la barcaza, pero la descarga se realiza exitosamente.

Día 41. Lunes 16 de septiembre 2013. Primer traslado de retorno a casa.

RT viaja en vehículo particular por tierra a Puerto Natales. MA viaja vía aérea a Punta Arenas. AP viaja vía aérea a Santiago.

Día 42. Martes 17 de septiembre 2013. Segundo traslado de retorno a casa.

GCB y RV viajan vía aérea a Santiago. Fin de la campaña a la meseta CHPN.

ANEXO 1.2. FOTOS DE LA 1ª CAMPAÑA (2013)



Foto A1.2-A. 1ª Campaña 2013. Agosto. Descarga de equipos desde L/M Danubio Azul al muelle de Laguna San Rafael (LSR).



Foto A1.2-B. 1ª Campaña 2013. Agosto. Traslado de moto de nieve como carga colgante desde LSR a Estación Glaciológica Glaciar San Rafael (EGGSR).



Foto A1.2-C. 1ª Campaña 2013. Agosto. Los 2 refugios en EGGSR.



Foto A1.2-D. 1ª Campaña 2013. Agosto. Exterior del módulo dormitorio en EGGSR.



Foto A1.2-E. 1ª Campaña 2013. Agosto. Interior del módulo comedor en EGGSR.



Foto A1.2-F. 1ª Campaña 2013. Agosto. Estación meteorológica automática en EGGSR. En primer plano la base DGPS.



Foto A1.2-5-G. 1ª Campaña 2013. Agosto. Pozo 1.



Foto A1.2-H. 1ª Campaña 2013. Agosto. Traslado de Torre 1 sobre trineos.

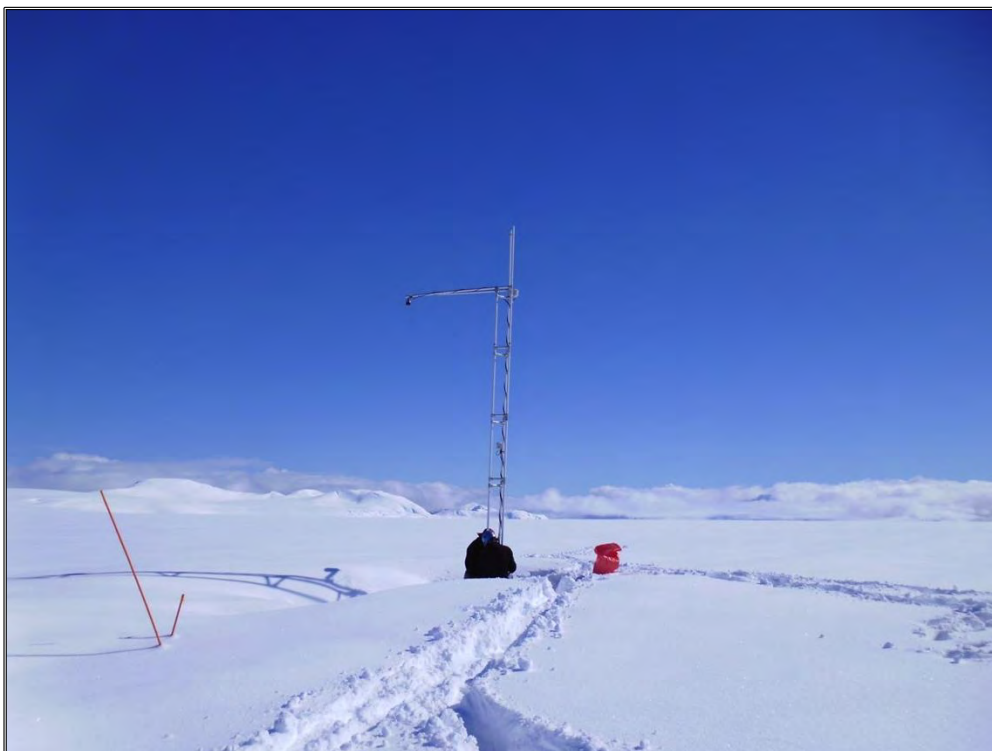


Foto A1.2-I. 1ª Campaña 2013. Agosto. Torre 1 instalada.



Foto A1.2-J. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Instalación Torre 2.



Foto A1.2-5-K. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Torre 2 instalada.



Foto A1.2-L. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Medición mediante GPR y DGPS cinemático.



Foto A1.2-M. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Medición mediante GPR y DGPS cinemático.



Foto A1.2-N. 1ª Campaña 2013. Agosto. Medición de puntos con instalación de baliza mediante DGPS estático.



**Foto A1.2-O. 1ª Campaña 2013. Agosto. Cámara 1, glaciar San Rafael.
Corresponde a la primera instalación.**



**Foto A1.2-P. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Cámara 1, glaciar San Rafael.
Corresponde a la segunda instalación (definitiva).**



Foto A1.2-Q. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Foto del glaciar San Rafael adquirida con la Cámara 1.

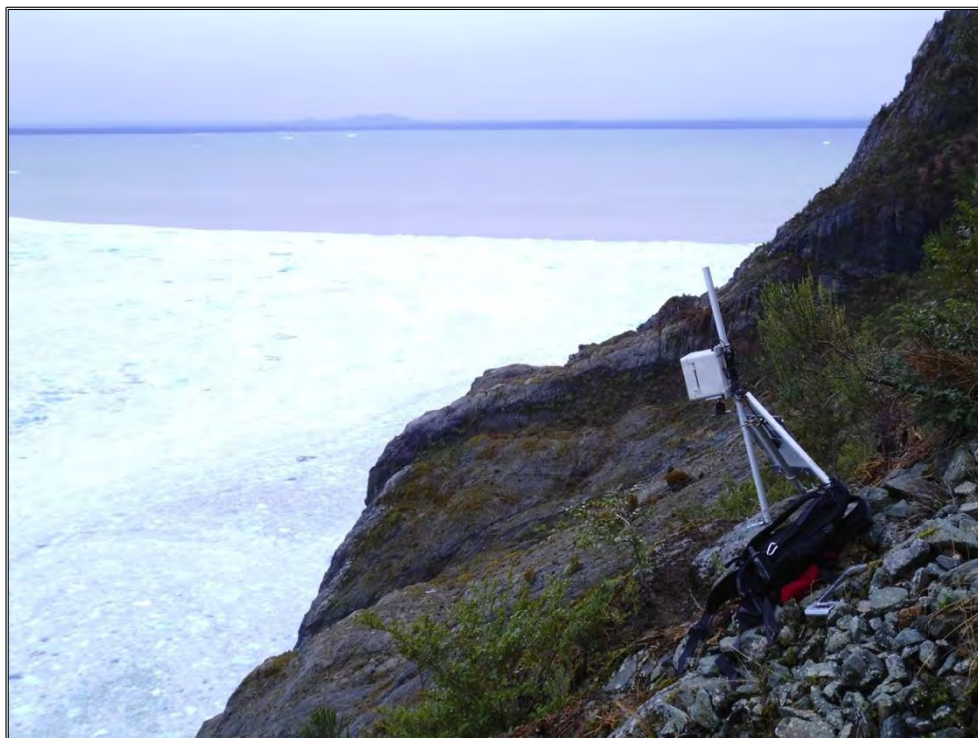


Foto A1.2-R. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Cámara 2, glaciar San Rafael.



Foto A1.2-S. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Cámara 2, glaciar San Rafael.



Foto A1.2-T. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Foto del glaciar San Rafael adquirida con la Cámara 2.



Foto A1.2-U. 1ª Campaña 2013. Agosto. Cabaña CONAF, LSR.



Foto A1.2-V. 1ª Campaña 2013. Septiembre. Maniobra de carga de la Barcaza Doña Lía en la playa de LSR.

ANEXO 2. 2ª CAMPAÑA (2013) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA

ANEXO 2.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 2ª CAMPAÑA (2013) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA

Día 1. Domingo 27 de octubre 2013. Traslado al lugar de trabajo.

AP, GCB y RV viajan vía aérea a Balmaceda y luego vía terrestre a Coyhaique.

Día 2. Lunes 28 de octubre 2013. Instalación de cámaras y descarga de datos de nivel.

A las 9:45 h comienza el vuelo de traslado en helicóptero desde Coyhaique al punto de aterrizaje en la playa cercana al frente del glaciar Colonia. A las 11:00 h se llega al lugar y a las 11:20 h comienza el acercamiento caminando hacia el punto donde estaba instalada la antigua cámara. A las 12:10 se llega al punto y se instala la primera cámara sobre un trípode de aluminio anclado en roca mediante pernos de expansión. Luego se realizan pruebas para comprobar el funcionamiento y orientación de la cámara y se finaliza la instalación. A las 13:45 h se avanza 150 m aproximadamente hacia el glaciar por la ladera del cerro y se busca un lugar adecuado para la instalación de la segunda cámara. Se instala la segunda cámara sobre un trípode de aluminio anclado en roca mediante pernos de expansión. Se revisa su funcionamiento y orientación y se finaliza la instalación. A las 14:40 h aproximadamente se inicia el retorno a la playa. A las 16:00 h se llega al punto donde se encuentra el sensor de nivel cercano a la playa, y se desciende a revisar el data logger marca Campbell modelo 850 y el sensor y se procede a descargar los datos. Se descargan los datos y se observa que el data logger presenta una advertencia indicando que los datos están fuera de rango, se revisa el sensor y se verifica que está bien instalado cerca de 2 metros bajo la superficie del lago. A las 17:30 h se retorna a la playa y se inicia el regreso en helicóptero. A las 18:00 h se deja a RV en Puerto Río Tranquilo donde concluye su participación. A las 18:50 GCB y AP aterrizan en Coyhaique.

Día 3. Martes 29 de octubre 2013. Espera en Coyhaique.

GCB y AP esperan en Coyhaique.

Día 4. Miércoles 30 de octubre 2013. Retorno a casa.

GCB y AP retornan a Santiago por vía aérea.

ANEXO 2.2. FOTOS DE LA 2ª CAMPAÑA (2013)



Foto A2.2-A. 2ª Campaña 2013. Octubre. Cámara 1 en el frente del glaciar Colonia.



Foto A2.2-B. 2ª Campaña 2013. Octubre. Cámara 2 en el frente del glaciar Colonia.

ANEXO 3. 3ª CAMPAÑA (2014) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL

ANEXO 3.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 3ª CAMPAÑA (2014) AL FRENTE DEL GLACIAR COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL

Día 1. Viernes 21 de febrero 2014. Traslado a Balmaceda y Puerto Tranquilo.

Traslado aéreo de Gabriela Collao (GC) y Rodrigo Vivanco (RV) de Santiago a Balmaceda. Traslado en camioneta a Coyhaique, encuentro con Diego González (DG), compra de materiales y traslado en camioneta a Puerto Río Tranquilo.

Día 2. Sábado 22 de febrero 2014. Traslado a San Rafael y trabajo de terreno.

Traslado en camioneta de RV, GC y DG a Santa Teresa. Encuentro con personal de Ian Farmer para cruce en zodiac del río Exploradores, traslado en minibús a puerto exploradores y transporte en lancha a muelle de CONAF en Parque Laguna San Rafael. GC y RV se trasladan a pie a la zona de las cámaras, debido a la vegetación en el camino no es posible llegar a las cámaras ese día antes de la hora de salida de la lancha. Alojamiento en la cabaña de CONAF.

Día 3. Domingo 23 de febrero 2014. Segundo día en San Rafael y viaje de vuelta a Puerto Tranquilo.

RV y GC se trasladan al sitio de las cámaras fotográficas. Se accede al sitio de la cámara 2 y se procede a la descarga de datos y revisión. Se encuentra que la caja de la cámara contiene agua y que la cámara está inoperativa por lo que se procede a desinstalar para regresarla a Santiago según indicaciones de la DGA. Se accede a la cámara 1, cuya revisión indica que está funcionando y no presenta agua en su interior. RV y GC se trasladan de vuelta al muelle de laguna San Rafael. DG descarga los datos del sensor de nivel. RV, GC y DG se trasladan de vuelta en lancha a Puerto Exploradores, luego en minibús a Santa Teresa donde cruzan el río Exploradores en Zodiac y luego regresan en camioneta a Puerto Tranquilo. Alojamiento en Puerto Río Tranquilo.

Día 4. Lunes 24 de febrero 2014. Traslado a Lago Colonia.

DG deja el grupo y vuelve a Coyhaique. RV y GC pasan a buscar un guía de Patagonia Expediciones y se trasladan por tierra hasta el final del camino de autos hacia lago Colonia. Luego se trasladan caminando hacia Sol de Mayo donde alojan en una cabaña de

Día 5. Martes 25 de febrero 2014. Traslado a frente del glaciar Colonia y trabajo en terreno.

Traslado de GC, RV y guía en Zodiac al otro lado del Lago Colonia, traslado a pie a lugar de campamento entre lago Colonia Y frente del glaciar. Armado del campamento. Traslado a la zona de sensor de nivel, revisión del sistema. Se encuentra la maleta del datalogger y batería con mucha agua, se presume que la maleta se encontró sumergida en el agua producto de un efecto GLOF desde el lago Cachet II. Se desinstala el sensor y datalogger y se comprueba el funcionamiento de batería y panel solar. Regreso a la zona de campamento. Alojamiento en el campamento.

Día 6. Miércoles 26 de febrero 2014. Trabajo en terreno y regreso a Sol de Mayo.

Traslado de RV y GC a la zona del sensor de nivel. Instalación del nuevo sensor y datalogger. Traslado a la zona de la cámara 1, revisión del estado del sistema, el sistema se encuentra inoperativo por lo que se procede a desinstalar la cámara según instrucciones de la DGA. Traslado a la cámara 2, se revisa el sistema y descargan datos, se encuentra que el sistema está inactivo pero que al reactivarlo se realizan pruebas y el sistema vuelve a operar correctamente. Regreso al campamento, desarme del campamento, regreso al otro lado del lago Colonia a Sol de Mayo. Alojamiento en Sol de Mayo.

Día 7. Jueves 27 de febrero 2014. Regreso a Puerto Tranquilo.

Regreso de RV, GC y guía caminando a la camioneta. Luego traslado en camioneta a Puerto Río Tranquilo. Alojamiento en Puerto Río Tranquilo.

Día 8. Viernes 28 de febrero 2014. Regreso a Coyhaique.

Traslado de RV y GC en camioneta a Coyhaique.

Día 9. Sábado 1 de marzo 2014. Regreso a Santiago.

Traslado de RV y GC en camioneta a Balmaceda y luego traslado aéreo a Santiago.

**ANEXO 3.2. FOTOS DE LA 3ª CAMPAÑA (2014) AL FRENTE DEL GLACIAR
COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL**



Foto A3.2-A. 3ª Campaña 2014. Febrero. Cámara 1 LSR.



Foto A3.2-B. 3ª Campaña 2014. Febrero. Cámara 2 LSR.



Foto A3.2-C. 3ª Campaña 2014. Febrero. Cruce lago Colonia.



Foto A3.2-D. 3ª Campaña 2014. Febrero. Bloque de hielo entre lago Colonia y lago proglacial Colonia.



Foto A3.2-E. 3ª Campaña 2014. Febrero. Estado caja datalogger sensor de nivel lago proglacial Colonia.



Foto A3.2-F. 3ª Campaña 2014. Febrero. Nuevo sensor de nivel lago proglacial Colonia.



Foto A3.2-G. 3ª Campaña 2014. Febrero. Caja datalogger nuevo sensor de nivel lago proglacial Colonia.

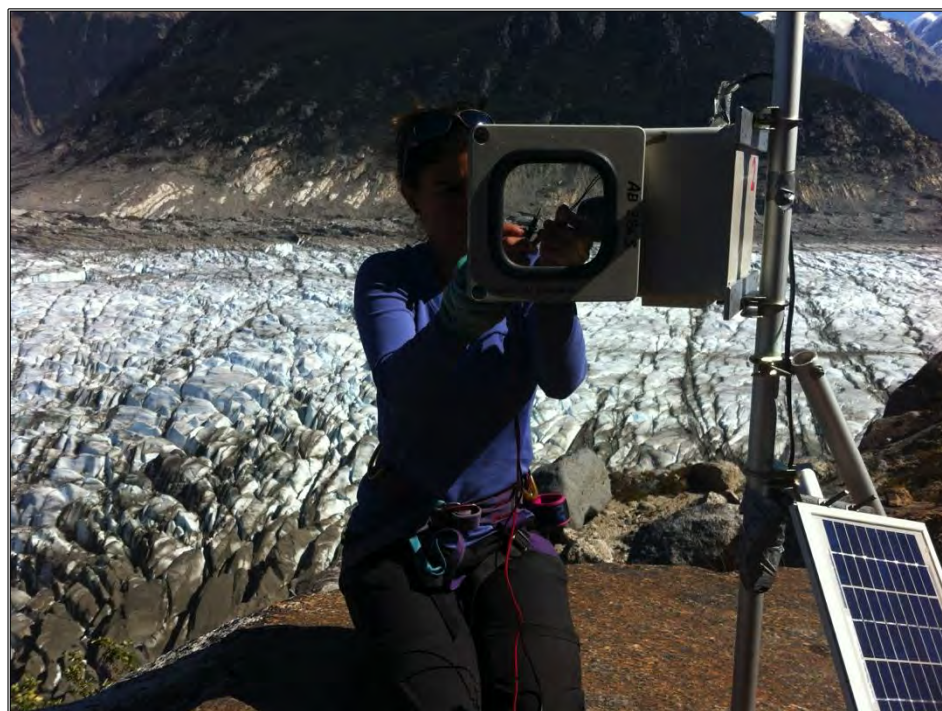


Foto A3.2-H. 3ª Campaña 2014. Febrero. Trabajo en cámara 2 lago proglacial Colonia.

ANEXO 4. 4ª CAMPAÑA (2014) A LA MESETA DEL CHPN

ANEXO 4.1. BITÁCORA DE ACTIVIDADES 4ª CAMPAÑA (2014) A LA MESETA DEL CHPN

DÍA 1. Miércoles 6 de agosto 2014. Inicio de la campaña.

Traslado aéreo de Alberto Peralta (AP), Rodrigo Vivianco (RV) y Carlos Fernández (CF) a Balmaceda. Traslado terrestre a Puerto Aysén. Alojamiento en Cabañas Queitao.

DÍA 2. Jueves 7 de agosto 2014. Estadía en Puerto Aysén.

Compras de alimentos y materiales en Puerto Aysén. Alojamiento de AP, RV y CF en Cabañas Queitao.

DÍA 3. Viernes 8 de agosto 2014. Estadía en Puerto Aysén.

Compras de alimentos y materiales en Puerto Aysén. Alojamiento de AP, RV y CF en Cabañas Queitao.

DÍA 4. Sábado 9 de agosto 2014. Traslado y estadía en Puerto Aysén.

Traslado aéreo de Ana María Marangunic (AMM), Gabriela Collao (GCB), Mariusz Potocki (MP), y Gino Casassa (GCR) desde Santiago a Balmaceda, y luego traslado terrestre desde Balmaceda a Puerto Aysén. Carguío de alimentos y equipos del camión a la Lancha Motor (L/M) Austral III (Capitán Mario Valladares) en "Aguas Muertas" junto al resto del grupo. Reunión de coordinación con el piloto del helicóptero de Suma Air, Sr. Alejandro Mainu. Alojamiento de todo el grupo en Cabañas Queitao en Puerto Aysén.

DÍA 5. Domingo 10 de agosto 2014. Espera en Puerto Aysén.

Día de espera en Puerto Aysén debido a malas condiciones meteorológicas. El puerto está cerrado por la autoridad marítima. Alojamiento de todo el grupo en Cabañas Queitao en Puerto Aysén.

DÍA 6. Lunes 11 de agosto 2014. Espera en Puerto Aysén.

Día de espera en Puerto Aysén debido a malas condiciones meteorológicas. El puerto está cerrado por la autoridad marítima. Alojamiento de todo el grupo en Cabañas Queitao en Puerto Aysén.

DÍA 7. Martes 12 de agosto 2014. Zarpe a laguna San Rafael.

Zarpa todo el grupo en la L/M Austral III a laguna San Rafael, excepto GCR quién se queda en Puerto Aysén junto al helicóptero y su tripulación.

DÍA 8. Miércoles 13 de agosto 2014. Arribo a laguna San Rafael.

Arribo de la L/M Austral III a laguna San Rafael. Descarga de equipos, incluidas las 2 motos de nieve y la cuadrimoto al muelle. Alojamiento del grupo en cabaña CONAF.

DÍA 9. Jueves 14 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB, que se alojan en la cabaña CONAF. L/M Austral III zarpa de regreso hacia Puerto Aysén con AMM y CF a bordo.

DÍA 10. Viernes 15 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB.

DÍA 11. Sábado 16 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

GCB, MP, AP y RV visitan la cámara fotográfica N° 1 en el frente del glaciar San Rafael para mantención y descarga de datos. La cámara había dejado de adquirir fotos el 16 de abril 2014. Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB. L/M Austral III arriba a Puerto Aysén. AMM y CF se trasladan a Balmaceda y luego a Santiago vía aérea.

DÍA 12. Domingo 17 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB.

DÍA 13. Lunes 18 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB.

DÍA 14. Martes 19 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB.

DÍA 15. Miércoles 20 de agosto 2014. Espera en laguna San Rafael.

Espera de buenas condiciones meteorológicas en laguna San Rafael por parte de RV, AP y GCB.

DÍA 16. Jueves 21 de agosto 2014. Ingreso a EGGSR.

Buen tiempo. 9:20 h despegue helicóptero Ecureuil AS350 B3 CC-AGG de Suma Air hacia laguna San Rafael, arribando 10:10 h. A las 11:20 comienza el primero de 7 vuelos desde laguna San Rafael a la Estación Glaciológica Glaciar San Rafael (EGGSR), Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), ubicada a cota 1200 m s.n.m., cerca de la línea de equilibrio del glaciar San Rafael. 1er vuelo pasajeros AP y GCR. 4 vuelos siguientes carga colgante. 6º vuelo pasajeros RV, GCR y MP. 7º y último vuelo carga colgante. El helicóptero vuela a laguna San Rafael a reaprovisionar combustible, y luego regresa a Cochrane a través de la meseta de CHPN. Búsqueda infructuosa del punto GPS de referencia instalado por la DGA el 2012 cerca de la estación meteorológica, está a todas luces cubierto por nieve. RV, AP, GCB, MP y GCR pernoctan en EGGSR.

DÍA 17. Viernes 22 de agosto 2014. Pozo 1.

Por la mañana RV, AP, GCB y MP van a Torre 1, explorando la ruta, y descubriendo que la torre sobresalía 3,2 m sobre la superficie, por lo cual la acumulación anual fue de 1,8 m puesto que se dejó hace 1 año sobresaliendo 5 m. La Torre 1 se ubica en E 609.295, N 4.821.881, UTM 18S, WGS84, unos 440 m hacia el oeste de su ubicación original de agosto 2013. Excavación del pozo de nieve hasta 1,5 m. En la Torre 1 se descargan datos del datalogger y excavación de un pozo hasta 1 m para retirar la Torre 1. Mal tiempo por la tarde, regreso a EGGSR.

DÍA 18. Sábado 23 de agosto 2014. Torre 1.

Excavación hasta 3 m en pozo de nieve al costado de Torre 1, con medición de nieve. Excavación hasta 2 m en la Torre 1 misma. Mal tiempo por la tarde, regreso a EGGSR.

DÍA 19. Domingo 24 de agosto 2014. Torre 1, perfil GPR longitudinal y Torre 2.

Buen tiempo. RV, AP y MP terminan el pozo al costado de Torre 1, con mediciones nivométricas hasta los 4 m. También se termina la excavación del pozo para retirar Torre 1, hasta los 3 m. Retiro de 6 m de estructura de Torre 1 y traslado a EGGSR, donde quedó depositada. GCB y GCR realizan mediciones con GPR sobre la transecta longitudinal hasta la Torre 2. La Torre 2 se encontró sobresaliendo 52 cm sobre la

superficie, en E 614.638, N 4.787.018, UTM 18S, WGS84, unos 30 m al sur de su posición original hace 1 año, con una acumulación anual de nieve de 7,48 m puesto que se había dejado sobresaliendo 8 m. Regreso a EGGSR.

DÍA 20. Lunes 25 de agosto 2014. Intento de GPR y Torre 2.

GCB y GCR inician mediciones con GPR, con el plan de realizar las mediciones transversales. Sorpresivamente el GPR no funciona, emitiendo un pito característico cada 2 segundos aproximadamente, apreciándose una señal directa muy débil, insuficiente para continuar las mediciones de radar. RV, AP y MP se trasladan a Torre 2 e inician un pozo de nieve al costado de la Torre 2, y un pozo en la Torre 2 para su retiro. Regreso a EGGSR.

DÍA 21. Martes 26 de agosto 2014. Torre 2 y perfil longitudinal GPS.

GCB y GCR realizan mediciones GPS cinemáticas sobre la transecta longitudinal hacia Torre 2, transectas transversales y mediciones GPS estáticas en varios puntos en el camino. RV, AP y MP se trasladan a Torre 2 y continúan excavando y midiendo la nieve en un pozo al costado de la Torre 2, y excavando un pozo en la Torre 2 para su retiro. Regreso a EGGSR.

DÍA 22. Miércoles 27 de agosto 2014. Torre 2.

Excavación y medición de nieve en un pozo al costado de la Torre 2, y excavación de un pozo en la Torre 2 para su retiro. Regreso a EGGSR.

DÍA 23. Jueves 28 de agosto 2014. Torre 2.

Finalización de la excavación y medición de nieve en un pozo al costado de la Torre 2, hasta los 4,3 m. Perforación de 3,7 m bajo el fondo del pozo para toma de muestras, hasta una profundidad total de 8 m. Finalización de la excavación de un pozo en la Torre 2 hasta los 5,6 m y retiro de los sensores principales (2 termómetros y correspondientes pantallas solares, 1 medidor de altura de nieve ultrasónico, caja con batería y datalogger) y retiro de 6 m de estructura metálica de Torre 2 a EGGSR. Lamentablemente la caja del datalogger estaba trizada con ingreso de humedad y presencia de hielo, por lo que el datalogger estaba muy oxidado. GCB y AP realizan medición de puntos GPS estáticos, transectas GPS cinemáticas y mediciones de densidad mediante Monte Rosa. Regreso a EGGSR.

DÍA 24. Viernes 29 de agosto 2014. Mal tiempo en EGGSR.

Mal tiempo en EGGSR. AP realiza mediciones de densidad de nieve con Monte Rosa en EGGSR.

DÍA 25. Sábado 30 de agosto 2014. Mal tiempo en EGGSR.

Mal tiempo en EGGSR.

DÍA 26. Domingo 31 de agosto 2014. GPS cinemático en Transecta 1.

Buen tiempo en EGGSR. GCB y GCR miden la Transecta 1 mediante GPS cinemático, junto con retirar balizas entre Torre 1 y EGGSR. AP y MP preparan con cemento una nueva plataforma para la AWS en EGGSR. Fin de los trabajos.

DÍA 27. Lunes 1 de septiembre 2014. Espera en EGGSR.

Mal tiempo en EGGSR. Espera de condiciones para evacuar EGGSR.

DÍA 28. Martes 2 de septiembre 2014. Espera en EGGSR.

Mal tiempo en EGGSR. Espera de condiciones para evacuar EGGSR.

DÍA 29. Miércoles 3 de septiembre 2014. Espera en EGGSR.

Tiempo regular en EGGSR. Espera de condiciones para evacuar EGGSR.

DÍA 30. Jueves 4 de septiembre 2014. Frente Colonia y 1er día de evacuación desde EGGSR.

Buen tiempo. El helicóptero Ecureuil AS350 B3 CC-AGG de Suma Air, piloto Alejandro Mainu, despegue desde Cochrane con Alexis Segovia (AS) y Diego González (DG) de la DGA, más Martín Bustamante (MB) y Cristián Peralta (CP) a bordo. MB y CP quedan en el frente del glaciar Colonia retirando una cámara fotográfica secuencial y un sensor de nivel de agua. AS y DG son trasladados en helicóptero a EGGSR. MP y GCR se trasladan en helicóptero desde EGGSR al frente del glaciar Colonia, donde se unen a MB y CP y les ayudan a desinstalar los instrumentos. MB, CP, MP y GCR retornan a Cochrane en helicóptero. AS, DG, RV, AP y MP permanecen en EGGSR.

DÍA 31. Viernes 5 de septiembre 2014. Evacuación de EGGSR.

Arriba el helicóptero Ecureuil AS350 B3 CC-AGG a EGGSR, piloto Cristian Velasquez. AS, DG, RV, AP y MP, y la carga, son evacuados a laguna San Rafael en 6 vuelos. AS y DG

bajan datos de la AWS Vaisala ubicada cerca del muelle de la laguna San Rafael, y posteriormente son trasladados en el helicóptero a Cochrane.

DÍA 32. Sábado 6 de septiembre 2014. Espera para evacuación en EGGSR.

GCB baja los datos de nivel de agua de la estación de la isla frente a la cabaña en laguna San Rafael. RV, AP y MP pernoctan en la cabaña de laguna San Rafael.

DÍA 33. Domingo 7 de septiembre 2014. Espera para evacuación en EGGSR.

RV, AP y MP esperan en la cabaña de laguna San Rafael, esperando el arribo de la lancha.

DÍA 34. Lunes 8 de septiembre 2014. Espera para evacuación en laguna San Rafael.

RV, AP y MP esperan en la cabaña de laguna San Rafael, esperando el arribo de la lancha.

DÍA 35. Martes 9 de septiembre 2014. Espera para evacuación en EGGSR.

Arriba la L/M Austral III a laguna San Rafael. Carguío de equipos. RV, AP y GCB zarpan hacia Puerto Aysén.

DÍA 36. Miércoles 10 de septiembre 2014. Espera para evacuación en EGGSR.

Arriba la L/M Austral III a Puerto Aysén a las 3 pm. RV, AP y GCB pernoctan en Cabañas Queitao.

DÍA 37. Jueves 11 de septiembre 2014. Traslado a Coyhaique.

Traslado a Coyhaique. RV, AP y GCB pernoctan en Cabañas Tío Nino.

DÍA 38. Viernes 12 de septiembre 2014. Fin de la expedición.

Regreso de RV, AP y GCB a Santiago vía aérea desde Balmaceda. Fin de la expedición.

ANEXO 4.2. FOTOS DE LA 4ª CAMPAÑA (2014) A LA MESETA DEL CHPN



Foto A4.2-A. 4ª Campaña 2014. 13 de agosto 2014, arribo de la L/M Austral II al muelle en laguna San Rafael.



Foto A4.2-B. 4ª Campaña 2014. 13 de agosto 2014, descarga de equipo en laguna San Rafael.



Foto A4.2-C. 4ª Campaña 2014. 16 de agosto 2014, mantención y descarga de fotos cámara fotográfica 1 en el frente del glaciar San Rafael.



Foto A4.2-D. 4ª Campaña 2014. Fotografía adquirida por la cámara fotográfica 1 instalada en el frente del glaciar San Rafael 16 de abril del 2014



Foto A4.2-E. 4ª Campaña 2014. 21 de agosto 2014, ingreso a EGGSR, meseta CHPN.



Foto A4.2-F. 4ª Campaña 2014. 21 de agosto 2014, estado de los módulos a la llegada a EGGSR.



Foto A4.2-G. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, estado en que se encontraba la Torre 1 al llegar al lugar.



Foto A4.2-H. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, Pozo 1: densidad y estratigrafía.



Foto A4.2-I. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, inicio mediciones GPR en EGGSR.



Foto A4.2-J. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, mediciones GPR y GPS perfil longitudinal.



Foto A4.2-K. 4ª Campaña 2014. 24 de agosto 2014, estado de la Torre 2 al llegar al lugar.



Foto A4.2-M. 26 de agosto 2014, mediciones de densidad en Pozo 2.



Foto A4.2-N. 4ª Campaña 2014. 26 de agosto 2014, excavación para recuperar Torre 1.



Foto A4.2-O. 4ª Campaña 2014. 28 de agosto 2014, excavación para recuperar Torre 2.



Foto A4.2-P. 4ª Campaña 2014. 28 de agosto 2014, mediciones DGPS.



Foto A4.2-Q. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, llegada de equipo DGA a EGGSR y partida de 2 integrantes de Geoestudios.



Foto A4.2-R. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, llegada a playa en el frente del glaciar Colonia.



Foto A4.2-S. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, frente del glaciar Colonia, desmantelamiento de la estación de nivel de agua.



Foto A4.2-T. 4ª Campaña 2014. 4 de septiembre 2014, frente del glaciar Colonia, desmantelamiento de cámara fotográfica.



Foto A4.2-V. 4ª Campaña 2014. Fotografía adquirida por la cámara 2 (retirada por Geoestudios el 4 de septiembre de 2014) en el frente del glaciar Colonia el 20 de abril del 2014.



Foto A4.2-V. 4ª Campaña 2014. 6 de septiembre 2014, descarga de datos estación de nivel de agua laguna San Rafael.

ANEXO 5. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS

ANEXO 5.1 CAMPAÑA N°1 MESETA CHPN (2013)

Esta campaña se realizó desde el 7 de agosto al 17 de septiembre de 2013. Los resultados principales se indican a continuación.

1. Instalación de dos cámaras fotográficas en el frente del Glaciar San Rafael. Bajada de fotografías de Cámara 2 desde el 16 al 30 de agosto y el día 14 de septiembre de 2013.
2. Instalación de nuevo punto base DGPS en afloramiento rocoso en EGGSR.
3. Datos DGPS en modo estático de la nueva base EGGSR.
4. Perfil longitudinal mediante GPR y DGPS en modo cinemático, total de 46.3 km.
5. Medición con GPR y DGPS en modo cinemático en 6 perfiles transversales, total 32 km.
6. Medición de densidad superficial con taladro Monte Rosa hasta 1 m de profundidad en 9 puntos (balizas temporales).
7. Medición con DGPS en modo estático en nueve puntos (balizas temporales).
8. 2 pozos estratigráficos hasta los 4 m de profundidad con densidad, temperatura, granulometría y características estratigráficas.
9. Muestras de nieve/neviza cada 20 cm, hasta los 4 m en el pozo y bajo los 4 m con taladro sacatestigos: Pozo 1 13 m; Pozo 2 6.4 m.
10. Instalación de 2 torres nivométricas: Torre 1 altura 5 m y Torre 2 altura 8 m sobre la superficie, c/u con 4 sensores de temperatura (2 en aire y 2 en nieve) y 1 sensor de altura, con datalogger Campbell CR800, alimentado con batería de 100 Ah sin panel solar.
11. Descarga de datos desde AWS Campbell CR 3000 en EGGSR.
12. Descarga de datos desde dos estaciones AWS en LSR.
13. Descarga de datos desde sensor de presión en muelle LSR.

ANEXO 5.2 CAMPAÑA N°2 LAGO PROGLACIAL COLONIA (2013)

Esta campaña se realizó del 27 al 30 de octubre de 2013. Los principales resultados fueron:

1. Instalación de 2 cámaras fotográficas en el frente del glaciar Colonia.
2. Descarga de datos desde sensor de presión en lago proglacial del frente del glaciar Colonia.

ANEXO 5.3 CAMPAÑA N°3 LAGO PROGLACIAL COLONIA Y LAGUNA SAN RAFAEL (2014)

Esta campaña se realizó del 21 de febrero al 1 de marzo de 2014. Los principales resultados fueron:

1. Desinstalación de cámara 2 en laguna San Rafael.
2. Descarga de fotos de las cámaras 1 y 2 en laguna San Rafael.
3. Descarga de datos del sensor de nivel muelle laguna San Rafael.
4. Revisión de la correcta operación de cámara 1 laguna San Rafael.
5. Instalación de nuevo sensor de nivel lago proglacial Colonia.
6. Desinstalación de cámara 1 lago proglacial Colonia.
7. Descarga de fotos cámaras lago proglacial Colonia.
8. Reactivación de cámara 2 en lago Colonia.

ANEXO 5.4 CAMPAÑA N°4 MESETA CHPN (2014)

Esta campaña se realizó desde el 6 de agosto al 12 de septiembre de 2014. Los resultados principales se indican a continuación.

1. Desinstalación de la cámara fotográfica 2 desde el frente del glaciar Colonia.
Descarga de fotografías desde el 26 de febrero del 2014 al 4 de septiembre 2014.
La cámara había dejado de funcionar el 20 de abril del 2014. Cámara con su caja y batería más panel solar entregada a la DGA.
2. Desinstalación del sensor de nivel de agua desde el frente del glaciar Colonia.

Descarga de datos desde el 20 de febrero 2014 al 4 de septiembre 2014. Sensor de nivel con su caja, data logger y batería más panel solar entregados a la DGA.

3. Mantenición de la cámara fotográfica 1 del frente del glaciar San Rafael. Descarga de fotografías desde el 13 de septiembre de 2013 al 16 de agosto del 2014. La cámara había dejado de funcionar el 16 de abril de 2014.
4. Bajada de datos del periodo 5 de abril del 2014 al 6 de septiembre de 2014 desde sensor de nivel de agua en la isla frente a la cabaña en laguna San Rafael.
5. Monumentación de un nuevo punto base DGPS en afloramiento rocoso en EGGSR, 2 m hacia el este del actual mástil de la estación meteorológica, con un perno a expansión con hilo de 5/8". Este es el mismo punto de referencia utilizado en la 1ª campaña 2013 de Geoestudios.
6. Datos DGPS en modo estático del punto de referencia EGGSR por periodos de varias horas en diversos días.
7. Perfil longitudinal mediante GPR y DGPS en modo cinemático desde EGGSR hasta Torre 2, total 40 km.
8. Medición con DGPS en modo cinemático en 6 perfiles transversales, total 32 km.
9. Medición de densidad superficial con Monte Rosa hasta 1 m de profundidad en 9 puntos (balizas temporales).
10. Medición con DGPS en modo estático en nueve puntos (balizas temporales).
11. 2 pozos estratigráficos hasta los 4 m de profundidad con densidad, temperatura, granulometría y características estratigráficas.
12. Muestras de nieve/neviza cada 10 cm, hasta los 4 m en el pozo y bajo los 4 m con taladro sacatestigos: Pozo 1, 6 m; Pozo 2, 8 m.
13. Medición de alturas sobre la superficie de Torre 1 (3,2 m) y Torre 2 (52 cm). Desinstalación de las 2 torres nivométricas que fueron depositadas al costado de un módulo en EGGSR. Recuperación en cada torre de los 4 sensores de temperatura (2 en aire con pantalla solar y 2 en nieve), 1 sensor ultrasónico de altura y 1 datalogger Campbell CR800, entregados a la DGA.

ANEXO 6. PROGRAMA DEL DATALOGGER DE LAS TORRES NIVOMÉTRICAS

```
'CR800 Series
'Created by Short Cut (2.8)

'Declare Variables and Units
Public BattV
Public T109_C
Public T109_C_2
Public T109_C_3
Public T109_C_4
Public SR50A(2)
Public dist_cor
Public DBTCDT

Alias SR50A(1)=Dist
Alias SR50A(2)=calidad

Units BattV=Volts
Units T109_C=Deg C
Units T109_C_2=Deg C
Units T109_C_3=Deg C
Units T109_C_4=Deg C

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
    DataInterval(0,360,Min,10)
    Average(1,BattV,FP2,False)
    Average(1,T109_C,FP2,False)
    Average(1,T109_C_2,FP2,False)
    Average(1,T109_C_3,FP2,False)
    Average(1,T109_C_4,FP2,False)
    Average(1,Dist,FP2,False)
    Average(1,calidad,FP2,False)
    Average(1,dist_cor,FP2,False)
    Average(1,DBTCDT,FP2,False)
EndTable

DataTable(Table2,True,-1)
    DataInterval(0,360,Min,10)
    Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
EndTable

'Main Program
BeginProg
    Scan(360,Min,1,0)
        If TimeIntoInterval(12,24,Hr) Then SW12(1)
        If TimeIntoInterval(0,24,Hr) Then SW12(0)
        'Default Datalogger Battery Voltage measurement BattV
        Battery(BattV)
```

```

'109 Temperature Probe measurement T109_C
Therm109(T109_C,1,1,1,0,_60Hz,1,0)
'109 Temperature Probe measurement T109_C_2
Therm109(T109_C_2,1,2,1,0,_60Hz,1,0)
'109 Temperature Probe measurement T109_C_3
Therm109(T109_C_3,1,3,1,0,_60Hz,1,0)
'109 Temperature Probe measurement T109_C_4
Therm109(T109_C_4,1,4,1,0,_60Hz,1,0)
'SR50A Sonic Ranging Sensor (SDI-12 Output) measurements Dist,
calidad, dist_cor, and DBTCDDT
SDI12Recorder(SR50A()),3,"0","M1!",1,0)
dist_cor=Dist*SQR((T109_C+273.15)/273.15)
'Call Data Tables and Store Data
CallTable(Table1)
CallTable(Table2)
NextScan
EndProg

```

ANEXO 7. RESULTADO DEL CÁLCULO DGPS DE LA POSICIÓN DE LA BASE CHPN2 MEDIANTE NOAA OPUS

Anexo 7.1. Cálculo con base ocupada en Campaña 2014.

FILE: base236m.14o OP1416778218300

NGS OPUS SOLUTION REPORT

=====

All computed coordinate accuracies are listed as peak-to-peak values.

For additional information: <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/about.jsp#accuracy>

USER: gino.casassa@gmail.com

DATE: November 23, 2014

RINEX FILE: base236m.14o

TIME: 21:52:24 UTC

SOFTWARE: page5 1209.04 [master50.pl](#) 022814 START: 2014/08/24 12:45:00
EPHEMERIS: igs18070.eph [precise] STOP: 2014/08/24 23:01:00
NAV FILE: brdc2360.14n OBS USED: 26107 / 26701 : 98%
ANT NAME: TSHIPPER_SR NONE # FIXED AMB: 94 / 111 : 85%
ARP HEIGHT: 0.351 OVERALL RMS: 0.013(m)

REF FRAME: IGS08 (EPOCH:2014.6458)

X: 1237807.347(m) 0.018(m)
Y: -4204038.506(m) 0.022(m)
Z: -4620196.040(m) 0.036(m)

LAT: -46 42 16.73400 0.006(m)
E LON: 286 24 22.19291 0.011(m)
W LON: 73 35 37.80709 0.011(m)
EL HGT: 1216.679(m) 0.044(m)

UTM COORDINATES

UTM (Zone 18)

Northing (Y) [meters] 4826696.270
Easting (X) [meters] 607491.532
Convergence [degrees] -1.02354415
Point Scale 0.99974202
Combined Factor 0.99955138

BASE STATIONS USED

PID	DESIGNATION	LATITUDE	LONGITUDE	DISTANCE(m)
	FALK	1267474.7		
	PARC	741030.9		
	CONZ	1095016.7		

This position and the above vector components were computed without any knowledge by the National Geodetic Survey regarding the equipment or field operating procedures used.

Anexo 7.2. Cálculo con base ocupada en Campaña 2014.

FILE: 01062451.13o OP1416839206558

NGS OPUS SOLUTION REPORT

=====

All computed coordinate accuracies are listed as peak-to-peak values.

For additional information: <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/about.jsp#accuracy>

USER: gino.casassa@gmail.com

DATE: November 24, 2014

RINEX FILE: 0106245p.13o

TIME: 14:39:00 UTC

SOFTWARE: page5 1209.04 master52.pl 022814 START: 2013/09/02 15:12:00
EPHEMERIS: igs17561.eph [precise] STOP: 2013/09/03 00:42:00
NAV FILE: brdc2450.13n OBS USED: 21206 / 21625 : 98%
ANT NAME: TRMR6 NONE # FIXED AMB: 61 / 75 : 81%
ARP HEIGHT: 0.1 OVERALL RMS: 0.012(m)

REF FRAME: IGS08 (EPOCH:2013.6708)

X: 1237807.357(m) 0.015(m)
Y: -4204038.530(m) 0.022(m)
Z: -4620196.078(m) 0.022(m)

LAT: -46 42 16.73424 0.003(m)
E LON: 286 24 22.19304 0.008(m)
W LON: 73 35 37.80696 0.008(m)
EL HGT: 1216.724(m) 0.033(m)

UTM COORDINATES

UTM (Zone 18)

Northing (Y) [meters] 4826696.263
Easting (X) [meters] 607491.535
Convergence [degrees] -1.02354418
Point Scale 0.99974202
Combined Factor 0.99955138

BASE STATIONS USED

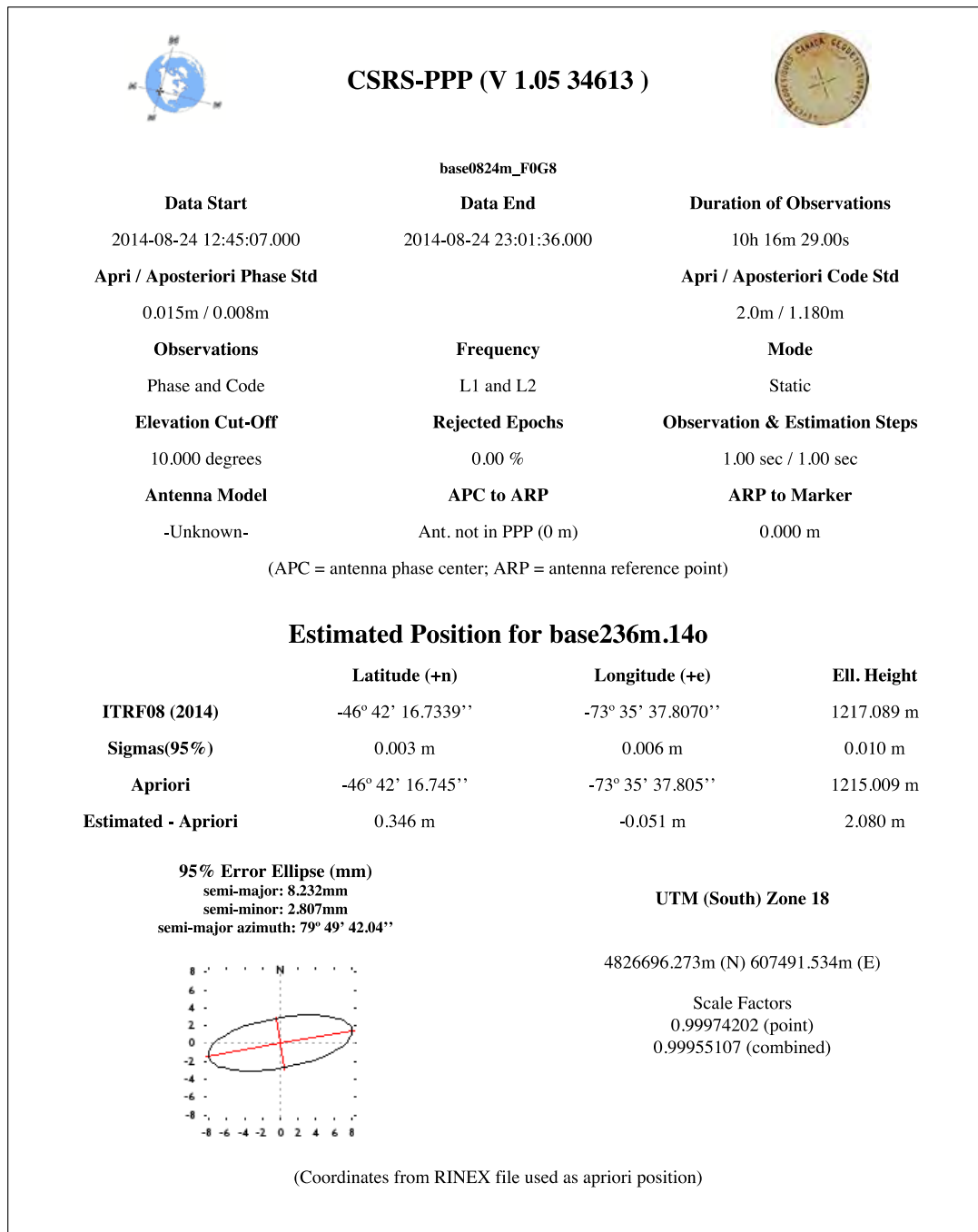
PID	DESIGNATION	LATITUDE	LONGITUDE	DISTANCE(m)
	FALK		1267474.7	
	PARC		741030.9	
	CONZ		1095016.7	

This position and the above vector components were computed without any knowledge by the National Geodetic Survey regarding the equipment or field operating procedures used.

8002 The Opus solution for your submitted RINEX file appears to be
8002 quite close to an NGS published control point. This suggests that
8002 you may have set your GPS receiver up over an NGS control point.
8002 Furthermore, our files indicate that this control point has not
8002 been recovered in the last five years.
8002 If you did indeed recover an NGS control point, we would
8002 appreciate receiving this information through our web based
8002 Mark Recovery Form at
8002 http://www.ngs.noaa.gov/products_services.shtml#MarkRecoveryForm.
8002

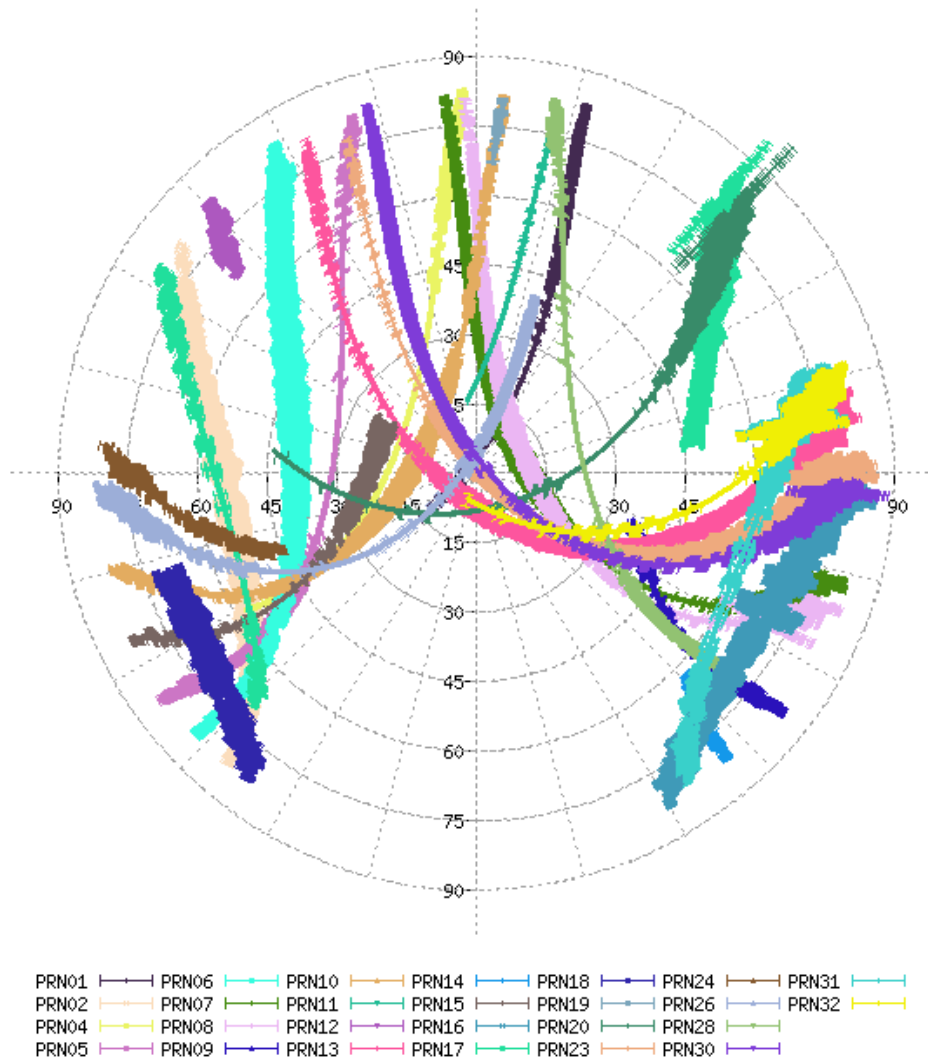
ANEXO 8. RESULTADO DEL CÁLCULO PPP DE LA POSICIÓN DE LA BASE CHPN2 MEDIANTE PPP NRC

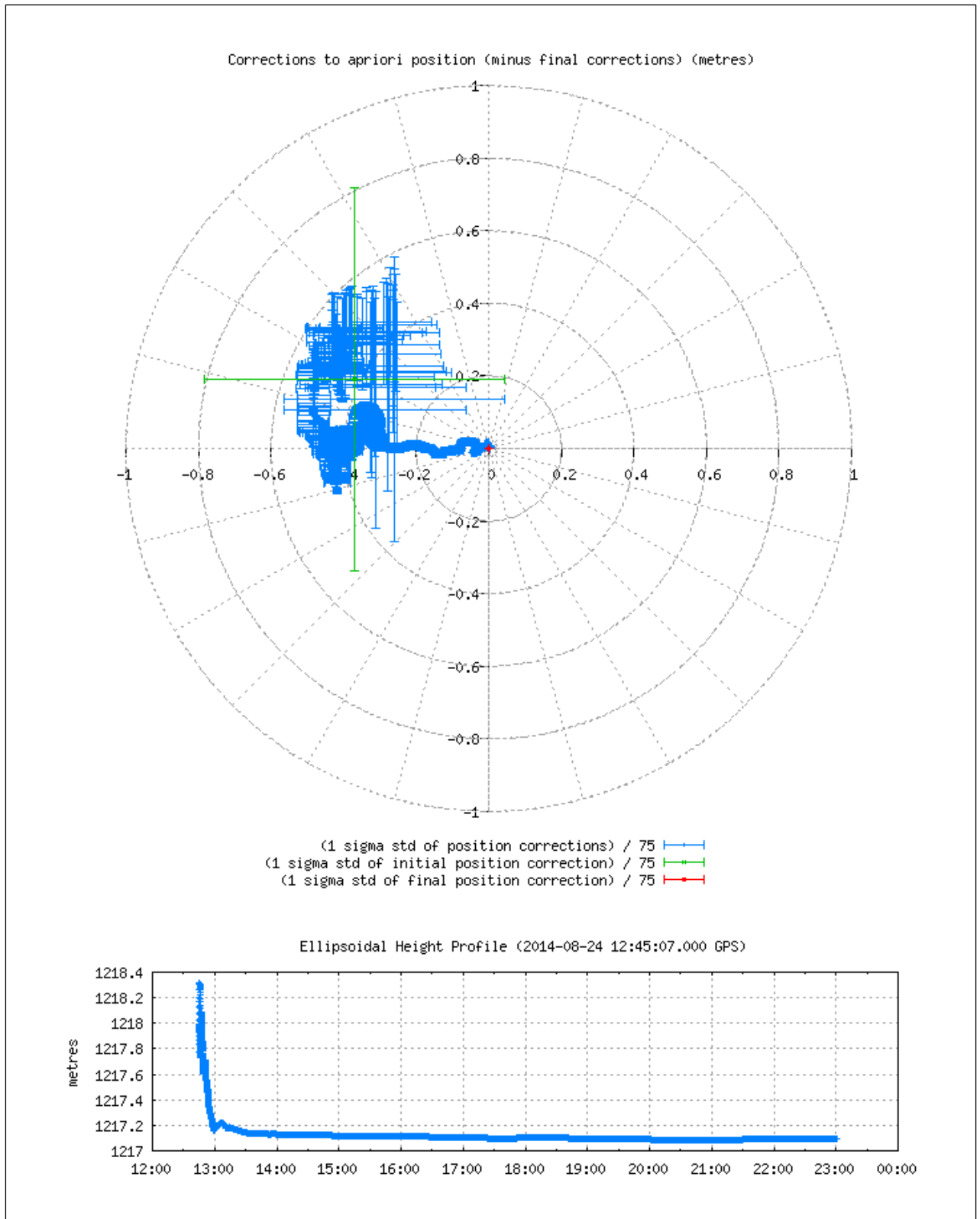
Anexo 8.1. Cálculo con base ocupada en Campaña 2014.

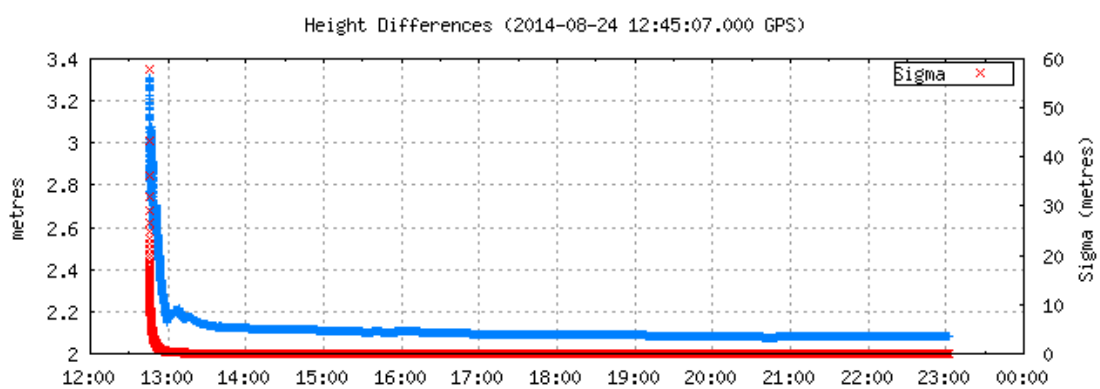
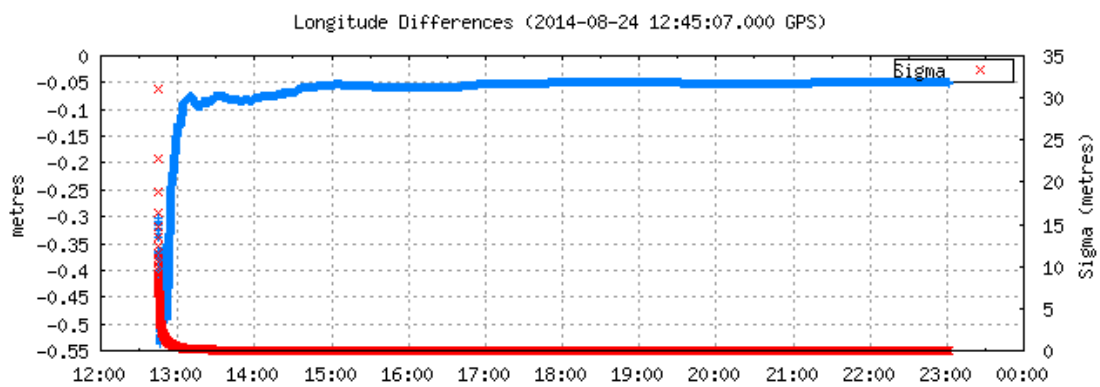
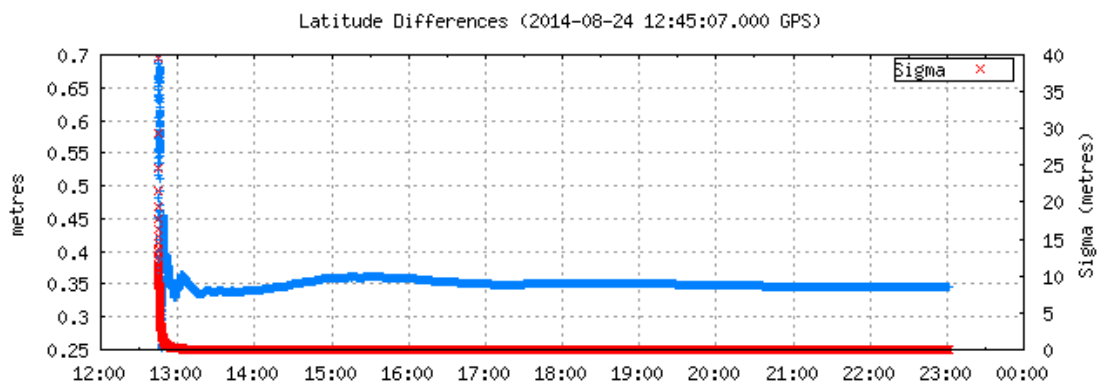


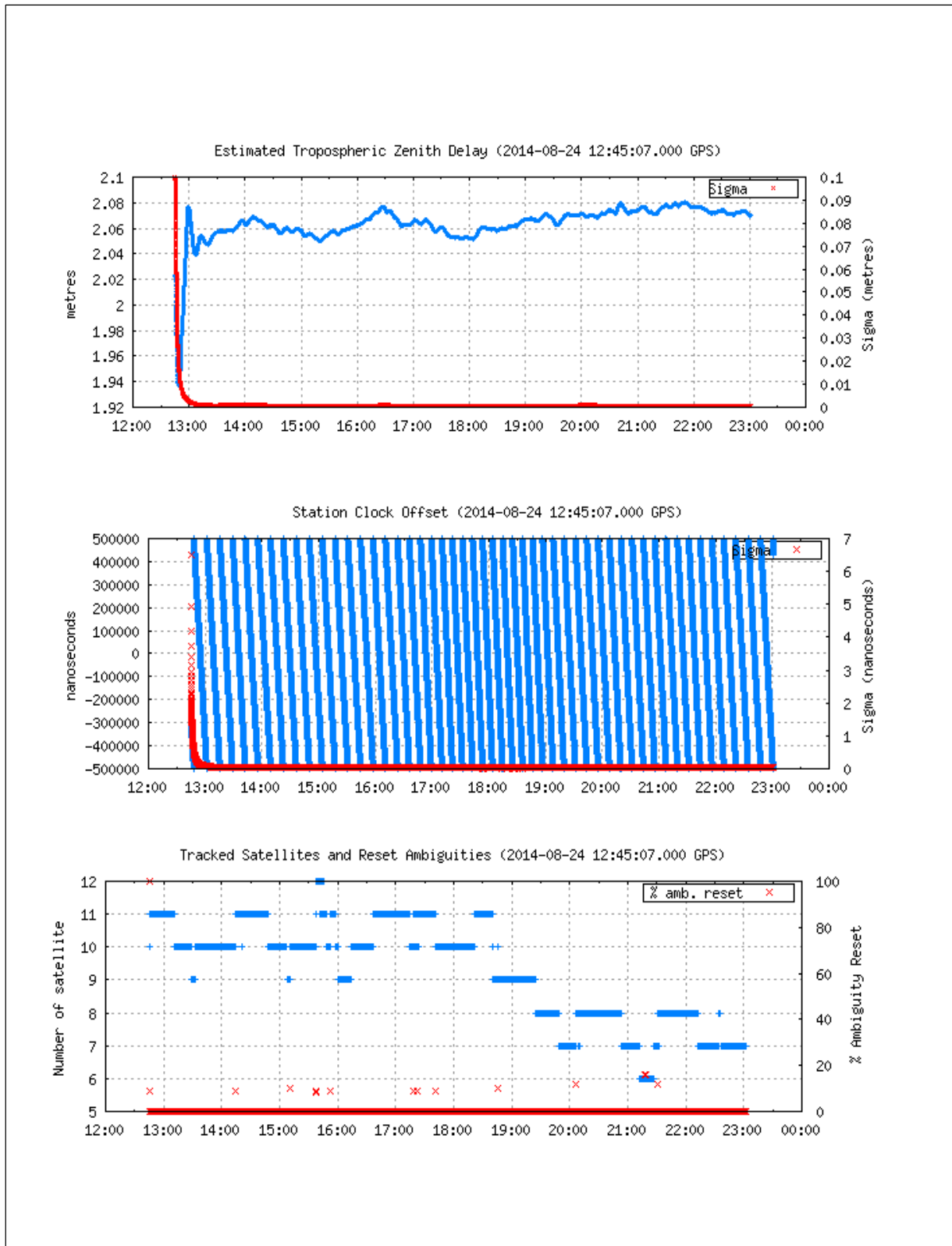
Estimated Parameters & Observations Statistics

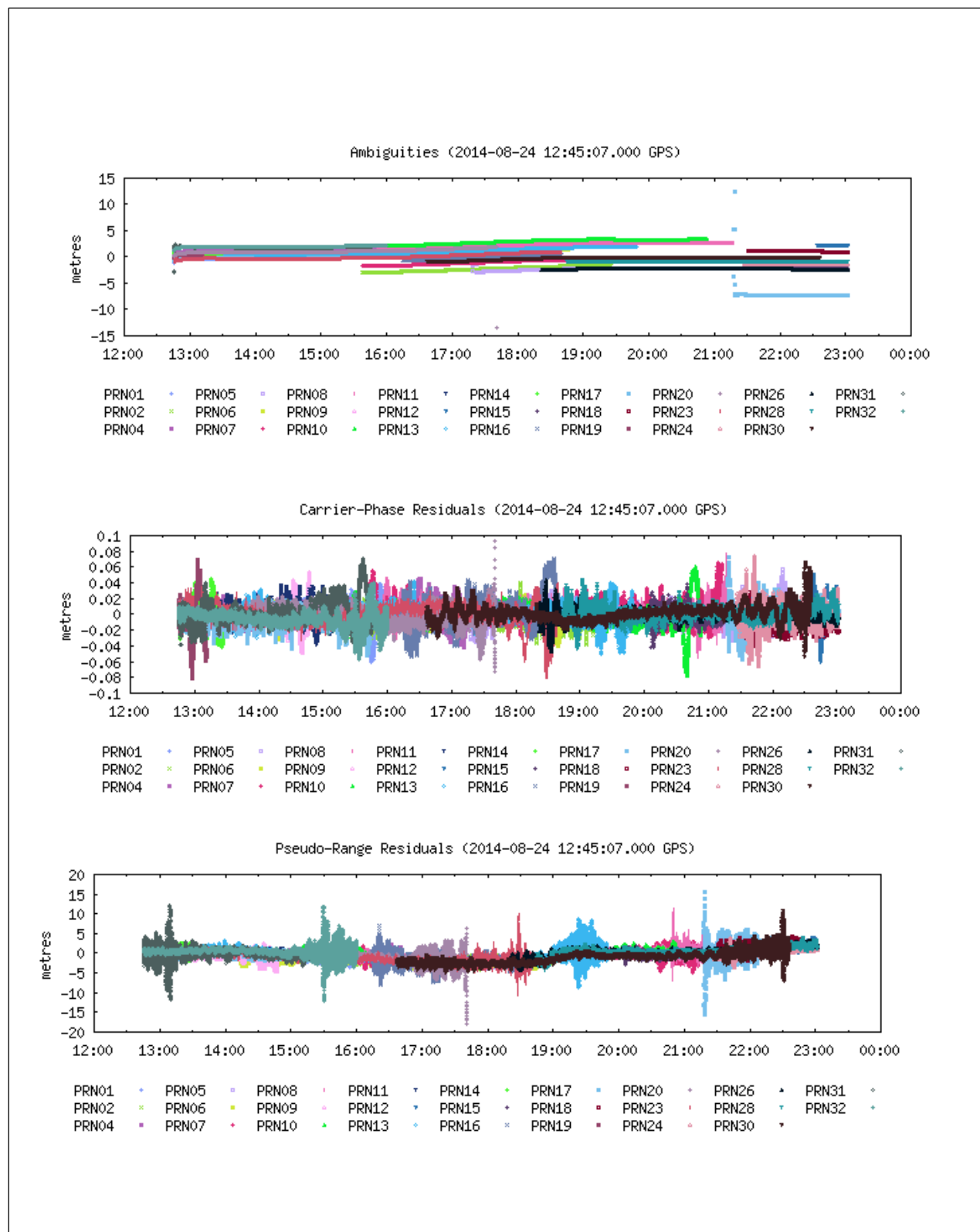
Pseudo-Range Residuals Sky Distribution











~~~ Disclaimer ~~~

Natural Resources Canada does not assume any liability deemed to have been caused directly or indirectly by any content of its PPP-On-Line positioning service.

If you have any questions, please feel free to contact:

**Geodetic Survey Division
Canada Centre for Remote Sensing
Natural Resources Canada
Government of Canada
615 Booth Street, Room 440
Ottawa, Ontario K1A 0E9
Phone: 613-995-4410 FAX: 613-995-3215
EMail: information@geod.nrcan.gc.ca**



**Natural Resources
Canada**

**Ressources naturelles
Canada**

Canada

Anexo 8.1. Cálculo con base ocupada en Campaña 2013.



CSRS-PPP (V 1.05 34613)



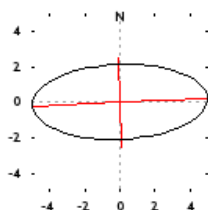
base		
Data Start	Data End	Duration of Observations
2013-09-02 15:12:45.000	2013-09-03 00:42:55.000	9h 30m 10.00s
Apri / Aposteriori Phase Std	Apri / Aposteriori Code Std	
0.015m / 0.008m	2.0m / 0.911m	
Observations	Frequency	Mode
Phase and Code	L1 and L2	Static
Elevation Cut-Off	Rejected Epochs	Observation & Estimation Steps
10.000 degrees	0.00 %	1.00 sec / 1.00 sec
Antenna Model	APC to ARP	ARP to Marker
TRMR6 NONE	L1= 0.086 m L2= 0.080 m	0.100 m

(APC = antenna phase center; ARP = antenna reference point)

Estimated Position for 01062451.13o

	Latitude (+n)	Longitude (+e)	Ell. Height
ITRF08 (2013)	-46° 42' 16.7344''	-73° 35' 37.8071''	1216.707 m
Sigmas(95%)	0.002 m	0.004 m	0.009 m
Apriori	-46° 42' 16.752''	-73° 35' 37.786''	1218.400 m
Estimated - Apriori	0.530 m	-0.438 m	-1.693 m

95% Error Ellipse (mm)
 semi-major: 4.998mm
 semi-minor: 2.116mm
 semi-major azimuth: 87° 44' 45.77''



UTM (South) Zone 18

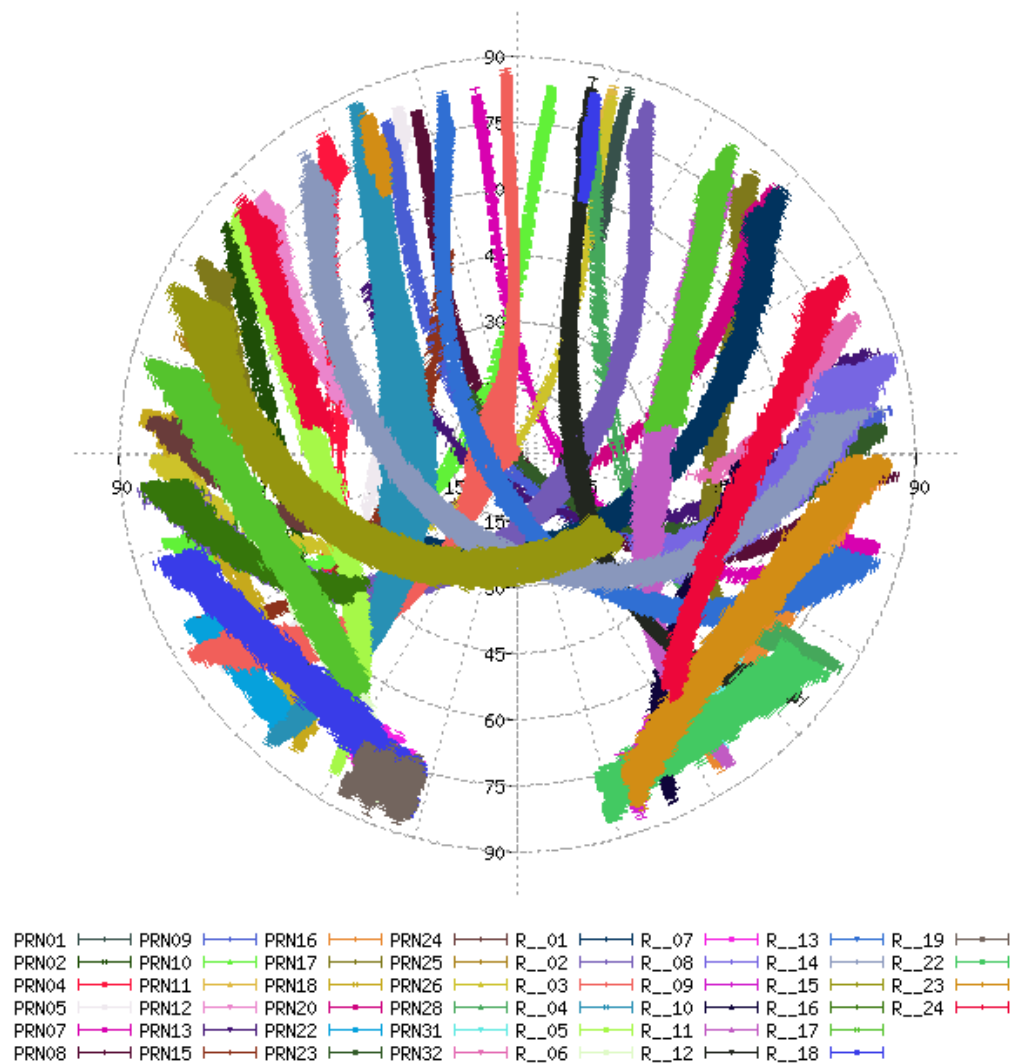
4826696.258m (N) 607491.532m (E)

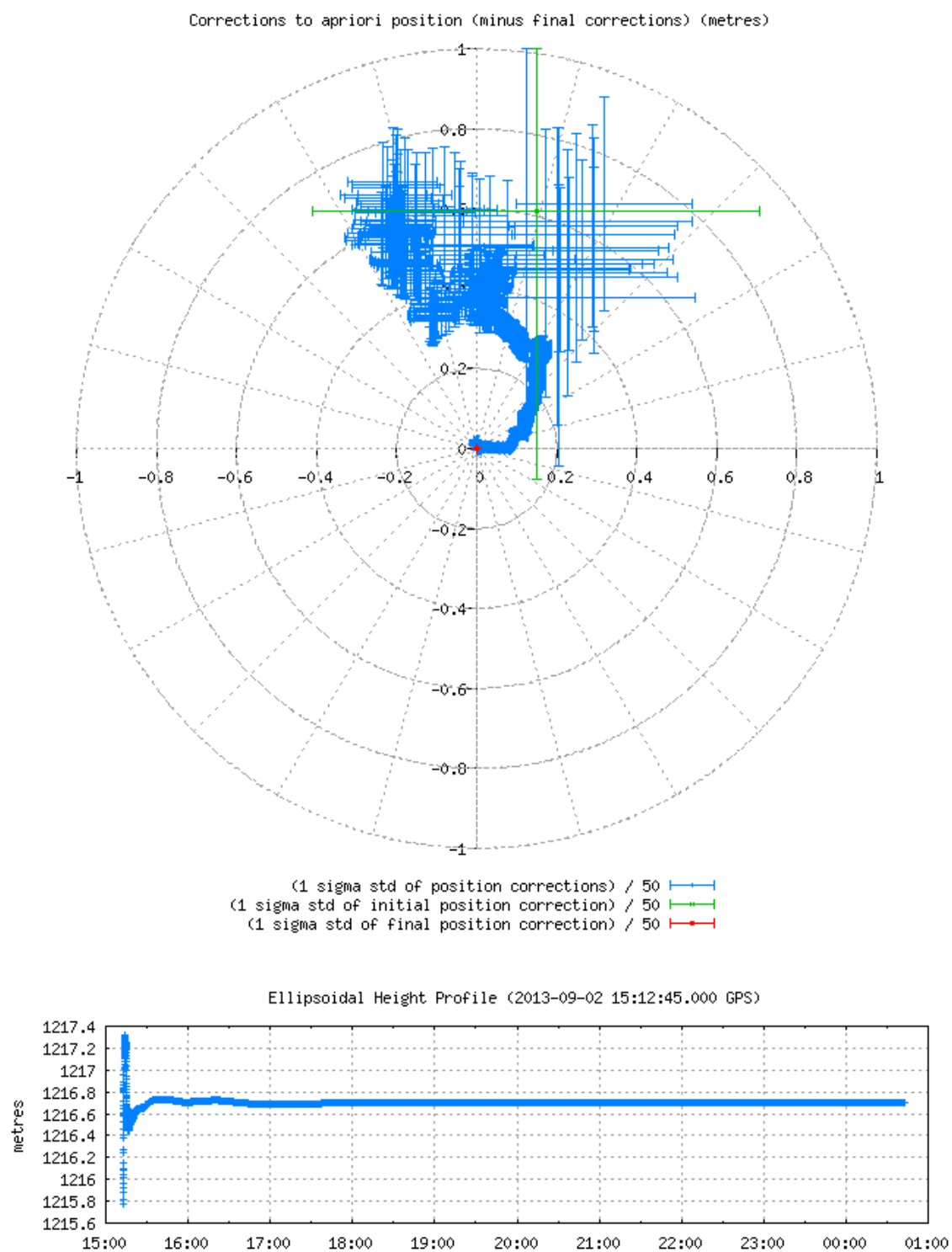
Scale Factors
 0.99974202 (point)
 0.99955113 (combined)

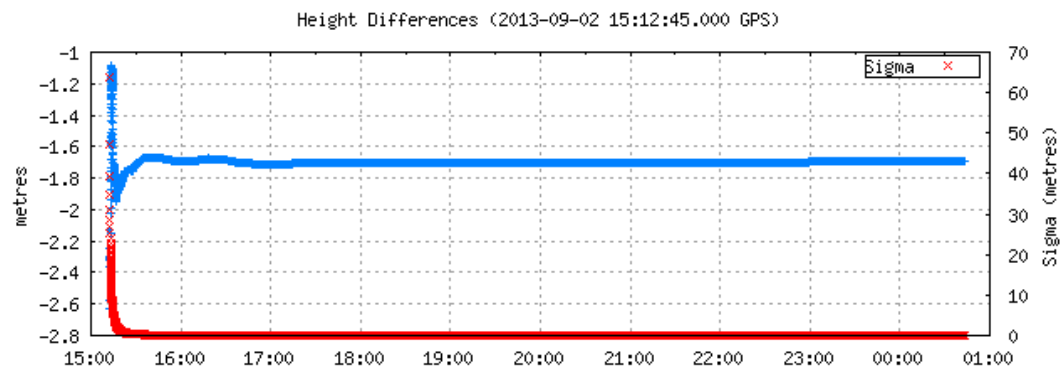
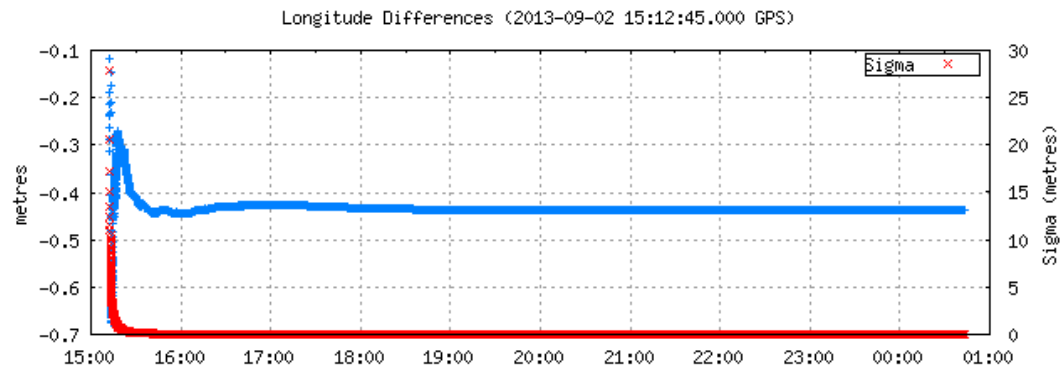
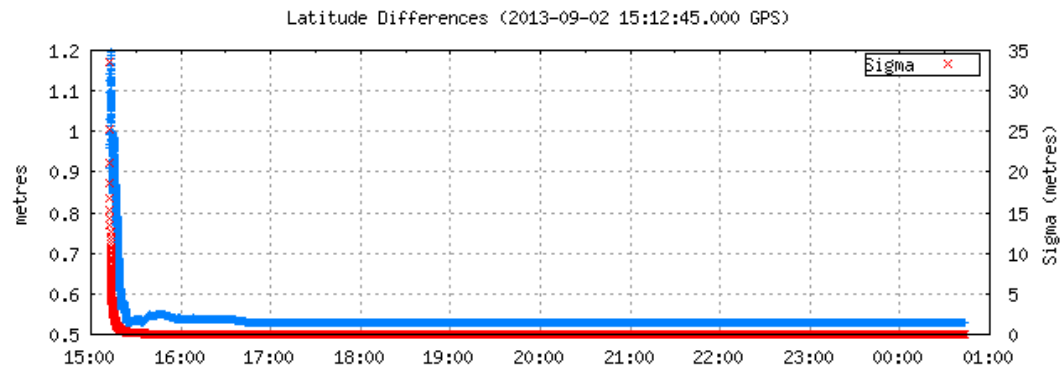
(Coordinates from RINEX file used as apriori position)

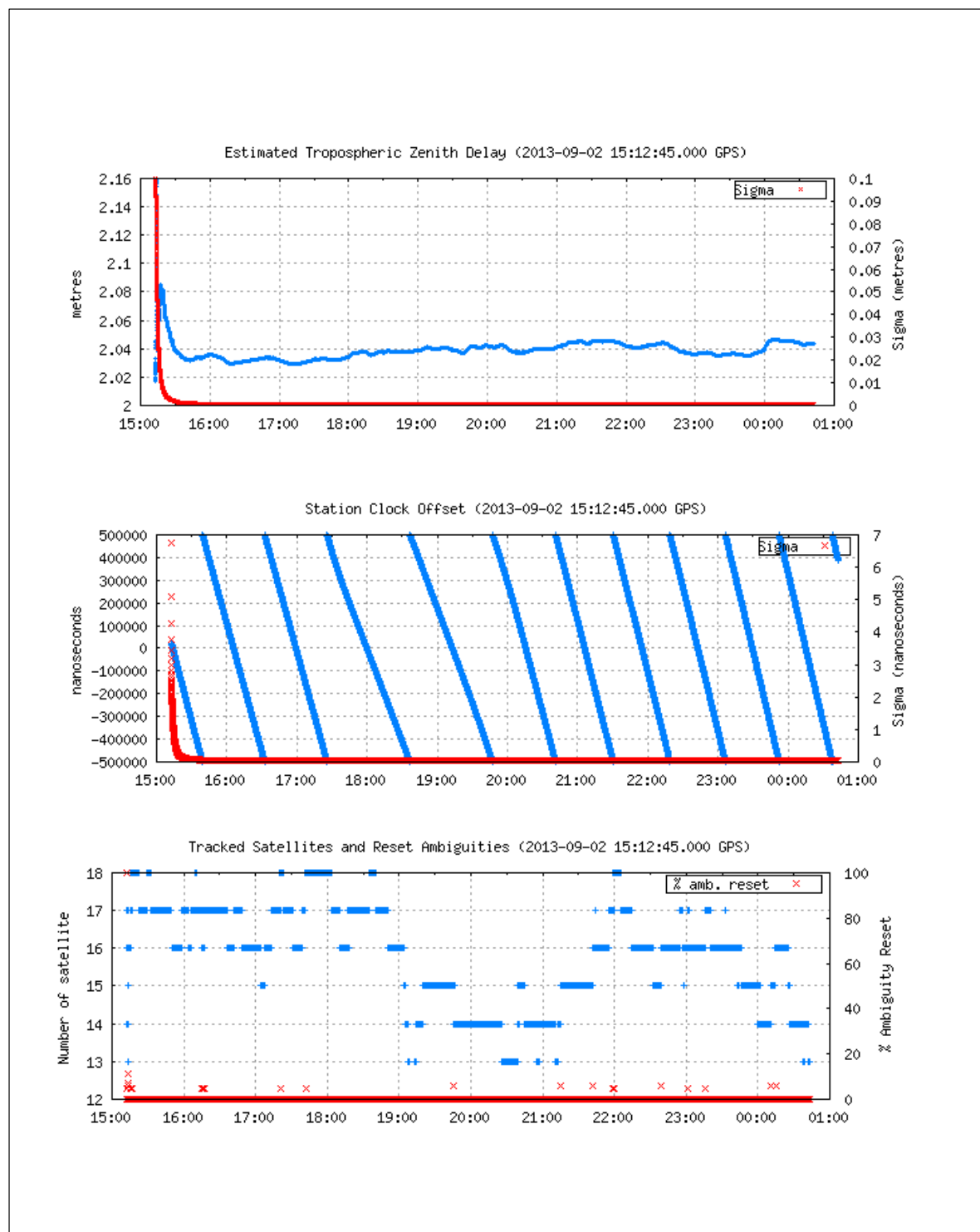
Estimated Parameters & Observations Statistics

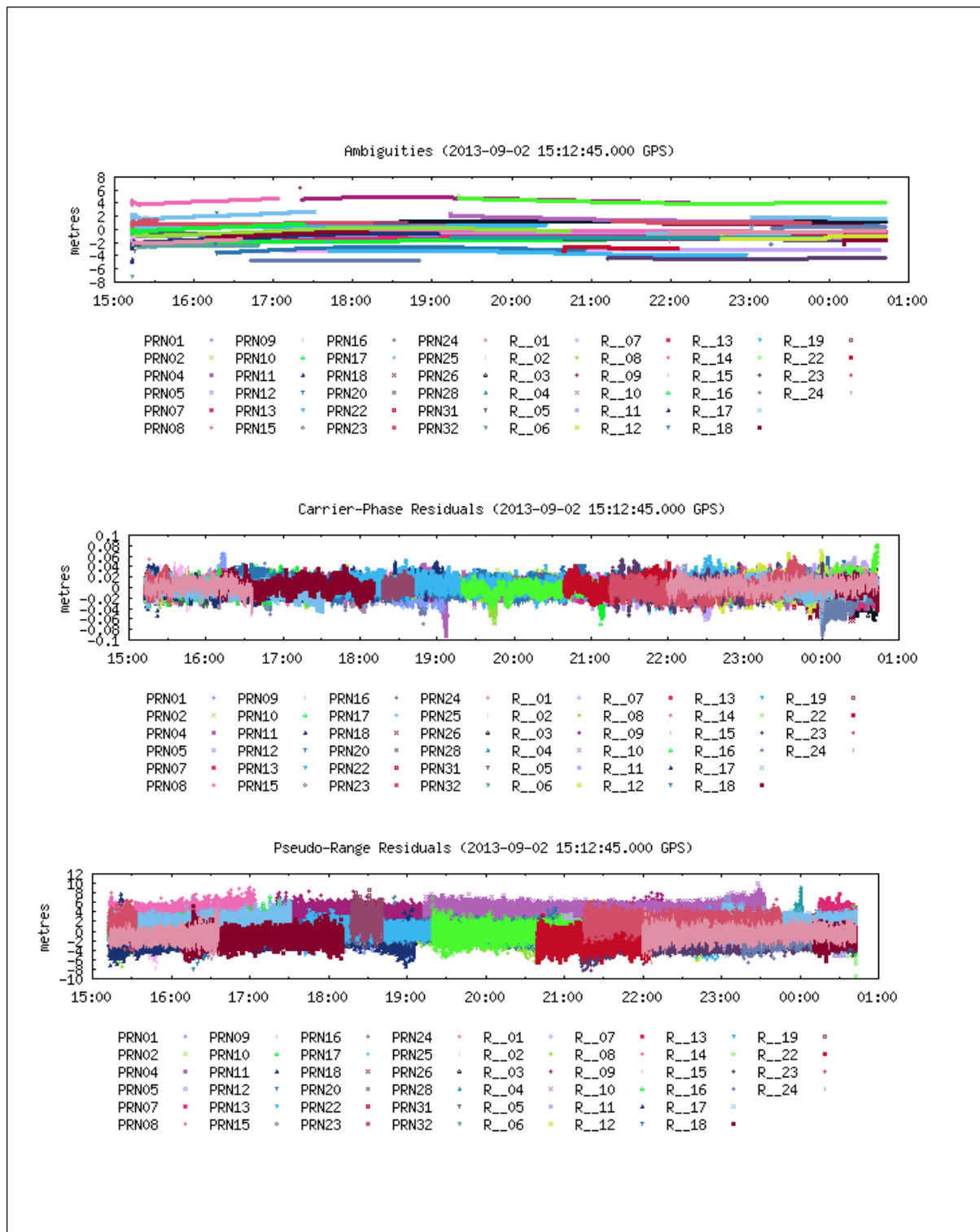
Pseudo-Range Residuals Sky Distribution











~~~ Disclaimer ~~~

**Natural Resources Canada does not assume any liability deemed to have been caused directly or indirectly by any content of its PPP-On-Line positioning service.**

**If you have any questions, please feel free to contact:**

**Geodetic Survey Division  
Canada Centre for Remote Sensing  
Natural Resources Canada  
Government of Canada  
615 Booth Street, Room 440  
Ottawa, Ontario K1A 0E9  
Phone: 613-995-4410 FAX: 613-995-3215  
E-Mail: [information@geod.nrcan.gc.ca](mailto:information@geod.nrcan.gc.ca)**



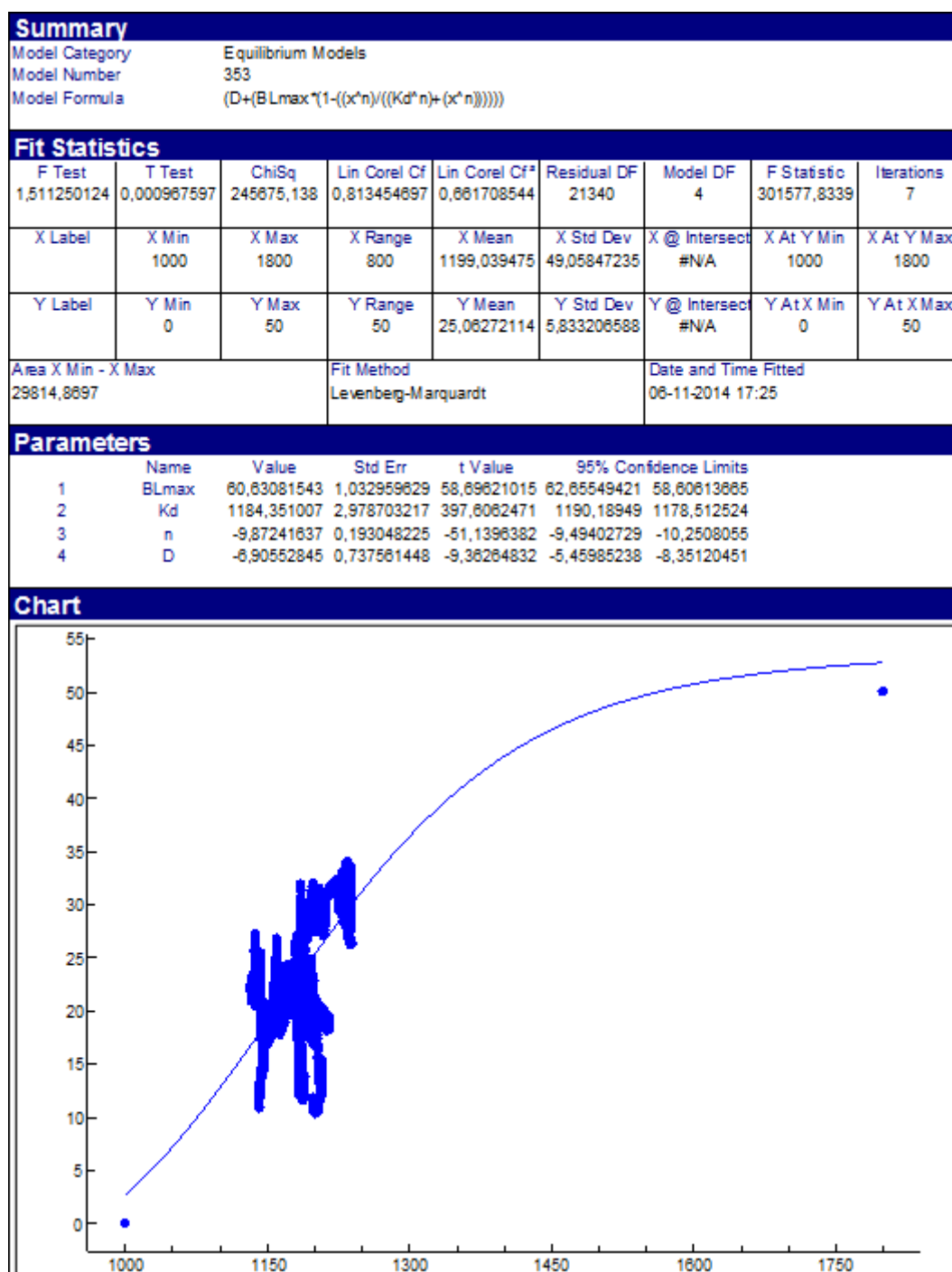
**Natural Resources  
Canada**

**Ressources naturelles  
Canada**

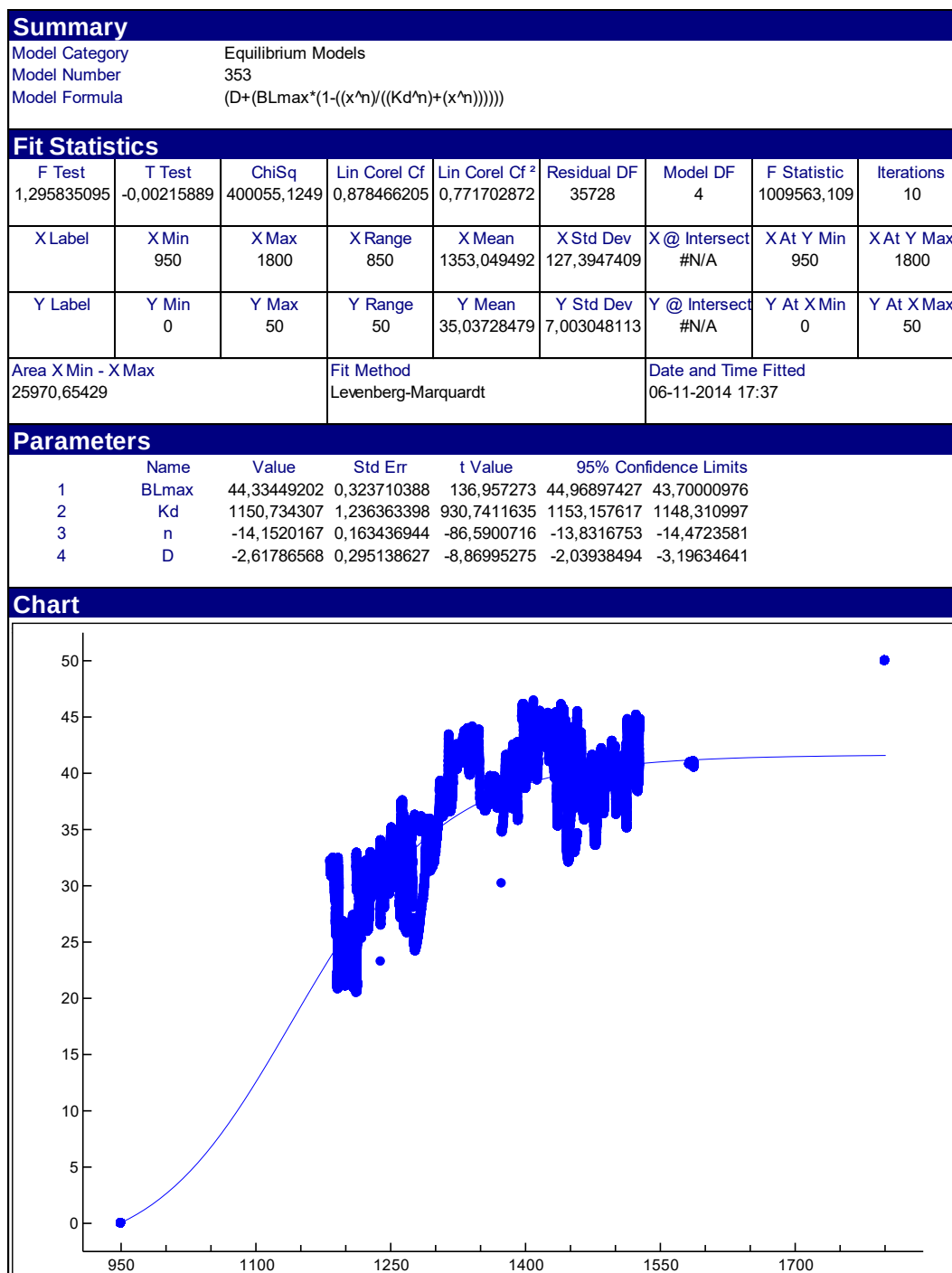
**Canada**

## ANEXO 9. AJUSTE DE LA ECUACIÓN SIGMOIDAL PARA LA INTERPOLACIÓN DE LA NAPA FREÁTICA

Resultados del ajuste de la ecuación sigmoïdal de los datos del glaciar San Rafael.

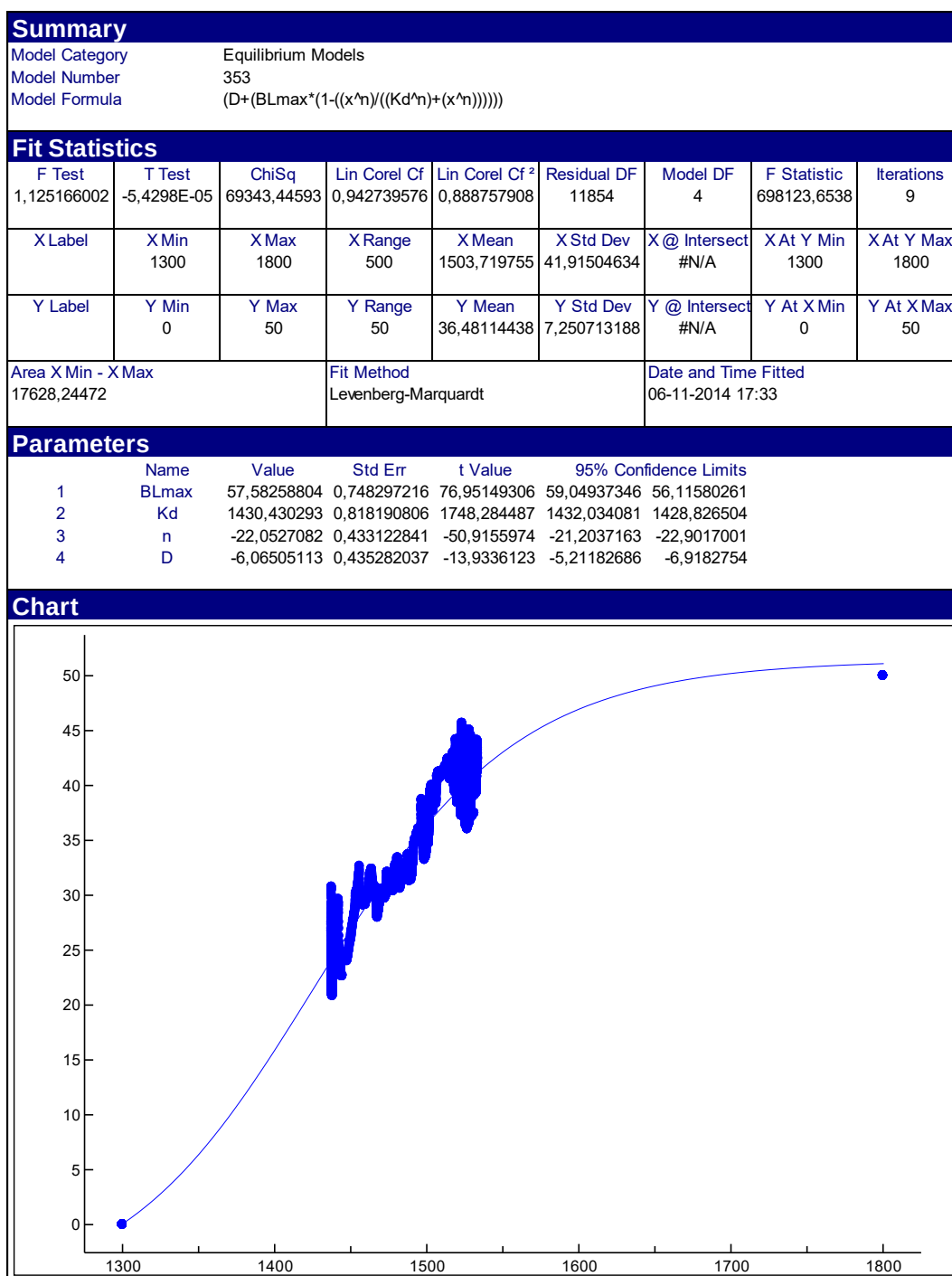


Resultados del ajuste de la ecuación sigmoideal de los datos del glaciar San Quintín.





Resultados del ajuste de la ecuación sigmoideal de los datos del glaciar Colonia.





## **ANEXO 10. ÍNDICE ANEXOS DIGITALES**

### **1. Transectas GPS y GPR**

Resultados de espesor procesados mediante GNSS y radar GPR en formato shape.

### **2. GNSS**

Datos GNSS brutos.

### **3.GPR**

Datos brutos obtenidos con el radar GPR

### **4. Fotos cámaras**

Fotografías de pruebas y primer periodo en cámaras fotográficas instaladas en el frente de los glaciares San Rafael y Colonia del periodo 2014

### **5. Datos meteorológicos y nivel de agua**

Datos descargados de la estación meteorológica en meseta de glaciar San Rafael estación Campbell, y laguna San Rafael, y datos de nivel descargados de la estación en laguna San Rafael y en lago proglacial glaciar Colonia. Datos de otras estaciones.

### **6. Fotos actividades de terreno**

Set de fotos de las actividades realizadas en terreno durante la campaña 2014.

### **6. Lidar, cambios de elevación**

Figuras y resultados.

**Fin del Informe Final.**